



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 24 № 1 2021



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 24 No. 1 2021

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2021

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

Индекс по каталогу «Пресса России» 45818

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Журнал основан в 1998 г.

Издается 6 раз в год.

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

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

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

Редакция журнала:

197376, Санкт-Петербург,

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

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

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

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

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr. phil. nat. Dr. h. c. mult.,
исполн. директор "Bimberg Center of Green Photonics",
Чанчуньский институт оптики, точной механики
и физики КАН, Чанчунь, Китай

Anna DZVONKOVSKAYA, Cand. of Sci. (Phys-Math),
R & D разработчик, HELZEL Messtechnik,
Кальтенкирхен, Германия

Matthias A. HEIN, PhD, Dr. Rer. Nat. Habil., Prof.,
Технический университет, Ильменау, Германия

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr. Rer. Nat., директор
департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия

Alexei KANAREYKIN, Dr. Sci., гл. исполн. директор,
Euclid TechLabs LLC, Солон, США

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

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

Журнал выполняет следующие задачи:

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

позиций ученых России в области теории и практики
радиоэлектроники;

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



Материалы журнала доступны по лицензии
Creative Commons Attribution 4.0



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

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).
Subscription index in "Press of Russia" catalogue is 45818
Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)
Founded in 1998. Issued 6 times a year.
The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).
The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.
Editorial address:
ETU, 5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, Russia
Tel.: +7 (812) 234-10-13
E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**
© ETU, design, 2020

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

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

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EXECUTIVE SECRETARY

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

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Оригинальные статьи

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Гафаров Е. Р., Саломатов Ю. П. Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров.....6

Парнес М. Д. Определение минимального шага сканирования луча фазированной антенной решетки.....15

Радиолокация и радионавигация

Монаков А. А. Универсальный алгоритм автофокусировки радиолокационных изображений.....22

Машков В. Г., Малышев В. А., Федюнин П. А. Метод оценки состояния снежно-ледяного покрова по углу Брюстера.....34

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

Sadowski W., Moskvina P. P., Kryzhanivskyy V. B., Skyba G. V., Prylypko O. I.
SEM Investigation of ZnO and CdO–ZnO Layers Grown by Sol-Gel Technology and a Multifractal Analysis of their Surface Depending on Synthesis Conditions.....48

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

Минчев Н. В. Методическое обеспечение для применения метода мажоритарного резервирования измерительных каналов.....59

Некролог.....69

Правила для авторов статей71

CONTENTS

Original articles

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Study of the Backscatter Radiation Pattern of a Quadrupole Antenna with a High-Impedance Ground Plane of Large Electrical Sizes.....6

Parnes M. D. Determining the Minimum Scan Step of an Electronically Scanned Antenna.....15

Radar and Navigation

Monakov A. A. A Versatile Algorithm for Autofocusing SAR Images.....22

Mashkov V. G., Malyshev V. A., Fedyunin P. A.
A Method for Assessing the State of the Snow and Ice Cover by the Brewster Angle.....34

Quantum, Solid-state, Plasma and Vacuum Electronics

Sadowski W., Moskvina P. P., Kryzhanivskyy V. B., Skyba G. V., Prylypko O. I.
SEM Investigation of ZnO and CdO–ZnO Layers Grown by Sol-Gel Technology and a Multifractal Analysis of their Surface Depending on Synthesis Conditions.....48

Metrology and Information-Measuring Devices and Systems

Minchev N. V. Methodological Support for Applying the Method of Majority Reservation in Measuring Channels.....59

Obituary.....69

Author's Guide.....71

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.67.012.12

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14>

Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров

Е. Р. Гафаров✉, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉egafarov@sfu-kras.ru

Аннотация

Введение. Устойчивость антенн глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) к многолучевой интерференции во многом определяется крутизной амплитудной диаграммы направленности (ДН) в области скользящих углов (углов, близких к горизонту). Крутизна ДН антенны определяется размером ее экрана. В статье представлено исследование зависимости крутизны амплитудной ДН от диаметра экрана квадрупольной антенны R .

Цель исследования. Анализ влияния диаметра обычного и высокоимпедансного экранов на ДН и диаграмму обратного излучения (ДОИ) квадрупольной антенны, в том числе в области скользящих углов.

Материалы и методы. Численные исследования проведены в САПР СВЧ (CST Studio Suite) методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (FDTD), а также методами постобработки результатов.

Результаты. Проведено моделирование квадрупольной антенны с емкостным высокоимпедансным и плоским проводящим экранами. Установлено наличие зависимости средней крутизны ДН на скользящих углах от диаметра экрана на нижней (f_H) и верхней (f_B) частотах ГНСС. В ходе исследования выполнен анализ ДН, отношения назад/вперед (down/up или DU), коэффициента усиления в направлении на горизонт (горизонтальное усиление – ГУ) и коэффициента многолучевости (MR) для диаметра $R = 1...20$ длин волн высокоимпедансного и проводящего экранов. Выявлено, что с целью получения высокой крутизны ДН на скользящих углах возможно применение различных типов экранов, но низкий уровень ДОИ достижим только с применением высокоимпедансной структуры. Показано, что одну и ту же крутизну амплитудной ДН (около 1 дБ/°) для нижних частот (НЧ) ГНСС возможно получить при разных диаметрах экрана $R = 12\lambda_0$ и, предположительно, $20\lambda_0$.

Заключение. Высокоимпедансный экран решетки вертикальных стержней диаметром $R = 12\lambda_0$ является предпочтительным для квадрупольной антенны на НЧ ГНСС. Дальнейшее увеличение экрана может лишь незначительно улучшать его характеристики.

Ключевые слова: антенна ГНСС, высокоимпедансный экран, проводящий экран, диаграмма обратного излучения

Для цитирования: Гафаров Е. Р., Саломатов Ю. П. Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.11.2020; принята к публикации после рецензирования 20.12.2020; опубликована онлайн 25.02.2021

Study of the Backscatter Radiation Pattern of a Quadrupole Antenna with a High-Impedance Ground Plane of Large Electrical Sizes

Evgeniy R. Gafarov✉, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉egafarov@sfu-kras.ru

Abstract

Introduction. The multipath resistance of GNSS antennas is largely determined by the gain slope of the amplitude radiation pattern at sliding angles (angles close to the horizon). The gain slope of the antenna radiation pattern is determined by the size of its ground plane. This article investigates the dependence between the gain slope and ground plane diameter R of a quadrupole antenna.

Aim. To analyse the impact of the diameter of conventional and high-impedance ground planes on the backscatter radiation pattern of a quadrupole antenna at sliding angles.

Materials and methods. Computer simulations were carried out in CAD CST Studio Suite using the methods of finite element analysis (FEM), finite difference time domain (FDTD) and template based post-processing.

Results. Quadrupole antennas with a capacitive high-impedance ground plane and a conventional flat ground plane were simulated. The dependence of the average gain slope at sliding angles on the diameter of the ground plane was determined at low (f_H) and upper (f_B) GNSS frequencies. The analysis of the down/up ratio, the roll-off gain and the multipath ratio for $R = 1 \dots 20$ of the wavelength of capacitive high-impedance and ground planes conventional flat was performed. It was established that higher gain slopes can be obtained using different types of ground planes; however, lower backscatter radiation values are achievable only using high-impedance structures. It was observed that the same slope of the radiation pattern (about 1 dB/°) for GNSS lower frequencies can be obtained at different $R = 12\lambda_0$, and, presumably, at $20\lambda_0$.

Conclusion. A high-impedance ground plane with a diameter of $R = 12\lambda_0$ is preferable for a quadrupole antenna at low GNSS frequencies. A further increase in the ground plane size will insignificantly improve its characteristics.

Keywords: GNSS antenna, high impedance ground screen, conventional ground screen, backward radiation pattern

For citation: Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Study of the Backscatter Radiation Pattern of a Quadrupole Antenna with a High-Impedance Ground Plane of Large Electrical Sizes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14

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

Submitted 17.11.2020; accepted 20.12.2020; published online 25.02.2021

Введение. Экран антенны спутниковой радионавигации является основным элементом, определяющим свойства диаграммы направленности (ДН) под скользящими углами к горизонту и способность антенны к подавлению отражений от рельефа подстилающей поверхности (так называемой многолучевой интерференции). Совместно эти факторы определяют точность и устойчивость работы системы позиционирования [1, 2].

Экраны высокоточных антенн глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) можно классифицировать различным образом:

– по типу: проводящие (ground plane – GP) и высокоимпедансные (high impedance structure – HIS), а также их комбинацию – полупрозрачные экраны;

– по форме: плоские, вогнутые и выпуклые (3D);

– по размеру: малые (не превосходящие длины волны излучения λ) и большие (более λ).

Свойства антенны в рабочем направлении (в так называемой верхней полусфере) описываются ДН, а в противоположном направлении (в нижней полусфере) – диаграммой обратного излучения (ДОИ). Наиболее простой способ уменьшения

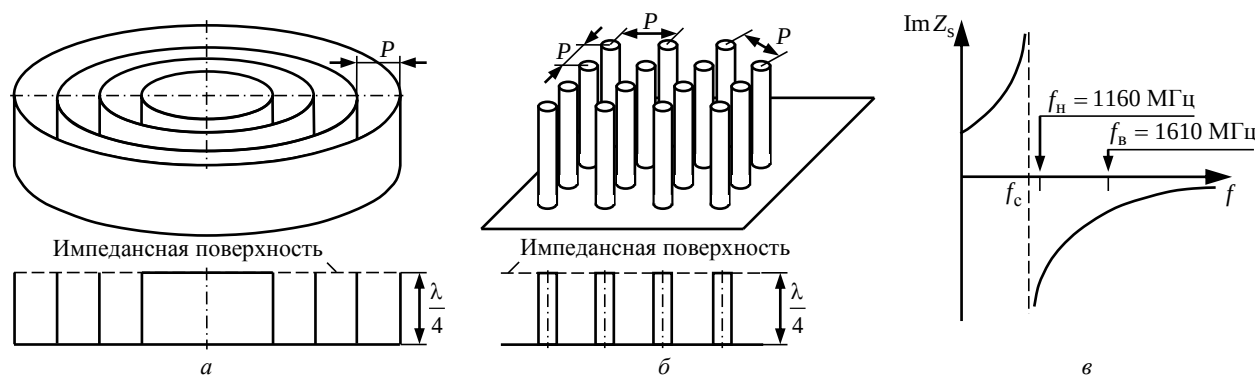


Рис. 1. Высокоимпедансная поверхность, сформированная гофрированным фланцем (а) и решеткой стержней с треугольной сеткой (б). Частотная зависимость реактивного сопротивления решетки стержней (в)

Fig. 1. High-impedance surface formed by a choke ring (a) and a rod array (b). Frequency dependence of reactance of rod array (c)

ДОИ состоит в использовании обычного плоского проводящего экрана, расположенного за антенной [3, 4]. Однако проводящие экраны могут искажать как фазовую, так и амплитудную ДН, поэтому в ГНСС экраны такого типа не нашли широкого применения. Наибольший интерес представляет анализ высокоимпедансных экранов, уменьшение ДОИ в которых сопровождается повышением стабильности фазового центра и увеличением кросс-поляризационной развязки [5]. Важное свойство высокоимпедансных поверхностей состоит в уменьшении амплитуды поверхностных волн благодаря формированию искусственного реактивного импеданса из проводящих областей.

Высокоимпедансные экраны для антенн ГНСС в виде структур гофрированного фланца (choke ring) известны с конца XX в. Наличие канавок структуры choke ring (рис. 1, а) формирует поверхность с высоким сопротивлением, показанную штриховой линией. В последнее время вместо choke ring применяется штыревая высокоимпедансная структура (рис. 1, б), более простая в изготовлении [6]. Основы функционирования такого экрана подобны структуре choke ring.

Как экран типа choke ring, так и решетка стержней являются емкостными высокоимпедансными поверхностями. Электрические размеры обоих экранов аналогичны. Шаг решетки стержней и расстояние между кольцами структуры choke ring одинаковы и составляют $P \approx \lambda/8$; высота обеих высокоимпедансных поверхностей равна четверти длины волны. Диаметр стержней много меньше длины волны. Параметры высокоимпедансных экранов изучены в [7, 8].

Частотная зависимость импеданса поверхности решетки стержней (рис. 1, в) имеет гиперболическую форму с резонансной частотой f_c . Нижнюю частоту диапазона ГНСС $f_H = 1160$ МГц выбирают вблизи f_c . На верхней частоте диапазона $f_B = 1610$ МГц импеданс поверхности уменьшается. Для повышения импеданса на f_B используют высокоимпедансные поверхности с несколькими резонансами поверхностного сопротивления [9], но для электрически больших экранов второй резонанс не является обязательным [8]. В [10] показано, что высокоимпедансная поверхность в виде решетки стержней обладает меньшей на 30 % крутизной частотной зависимости поверхностного сопротивления по сравнению с choke ring и может использоваться на всех частотах ГНСС. Кроме того, известно [11], что при достаточно высоком импедансе структуры уровень ДН слабонаправленного источника в направлениях, близких к касательным к экрану, практически не зависит от импеданса и определяется только размером экрана. При этом условии ДОИ перестает зависеть от импеданса экрана для любых углов возвышения, что снижает требования к сопротивлению импедансной поверхности.

Неоднократно отмечалась важность резкого перепада коэффициента усиления (КУ) в области скользящих углов для антенн ГНСС [5, 10]. Поэтому в настоящей статье представлены результаты исследований высокоимпедансных и проводящих экранов как малых, так и больших электрических размеров в совокупности со слабонаправленной антенной для оценки ее характеристик направленности.

Методы исследования. Численное моделирование проведено при помощи пакета САПР CST Studio Suite [12] методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием постобработки результатов моделирования (Template based Post-processing).

Результаты исследований.

Квадрупольная антенна. Для исследования с двумя типами экранов использована квадрупольная антенна, так как ее ДН является достаточно широкой как на нижних, так и на верхних частотах ГНСС. Квадрупольная антенна представляет собой антенные элементы в виде четырех монополей (рис. 2, а), запитываемых делителем мощности. Делитель обеспечивает равное деление мощности между монополями со сдвигом фаз между ними 90° с целью формирования поля круговой поляризации. Делитель выполнен в двухслойной реализации для уменьшения размеров антенны. Экран двух слоев делителя и монополей является общим. Размеры антенны $96 \times 96 \times 45$ мм. Антенна является всеи-
стемной, т. е. работает во всех диапазонах частот ГНСС. Типичные ДН на нижней (f_H) и верхней (f_B) частотах ГНСС приведены на рис. 2, б (θ – угол возвышения, верхней полусфере соответ-

ствуют значения угла $\theta = -90 \dots 0 \dots 90^\circ$). Подробное описание антенны представлено в [13].

Квадрупольная антенна имеет широкую ДН, но также и высокий уровень ДОИ. Сохранение широко-
угольной ДН на частотах приема навигационных спутников и одновременное уменьшение ДОИ возможно с применением высокоимпедансного экрана.

Анализ поля квадрупольной антенны с экраном большого электрического размера. Проанализирована антенная система (рис. 3), состоящая из слабо-
направленной квадрупольной антенны и высокоимпедансного экрана диаметром $R/\lambda_0 = 1 \dots 20$, где $\lambda_0 = c/f_0$ (c – скорость распространения электро-
магнитной энергии в вакууме; $f_0 = 1400$ МГц – средняя частота диапазона ГНСС). Чтобы исключить зависимость поверхностного импеданса от направления тока в плоскости экрана, стержни высокоимпедансной поверхности расположены на треугольной сетке. Проведено сравнение с квадрупольной антенной на плоском проводящем экране того же диаметра.

Численное моделирование антенной системы выполнено в среде CST Studio Suite во временной области на прямоугольной сетке (Hexahedral). На первом этапе исследования методом численного моделирования получены ДН. Далее постобработкой данных для скользящих углов ($\theta = 80 \dots 100^\circ$) получены вторичные результаты: отношение ДН и ДОИ в нижней полусфере ($\theta = -90 \dots \pm 180 \dots 90^\circ$) DU , в направлениях, зеркальных относительно скользящего угла $\theta = 90^\circ$:

$$DU(\theta) = \frac{F(180^\circ - \theta)}{F(\theta)}$$

и средняя крутизна ДН в области скользящих углов:

$$\bar{F}'_\theta = \left\{ \sum_{\theta=80}^{100} [F(\theta) - F(\theta+1)] \right\} / 20$$

с шагом $\Delta\theta = 1^\circ$.

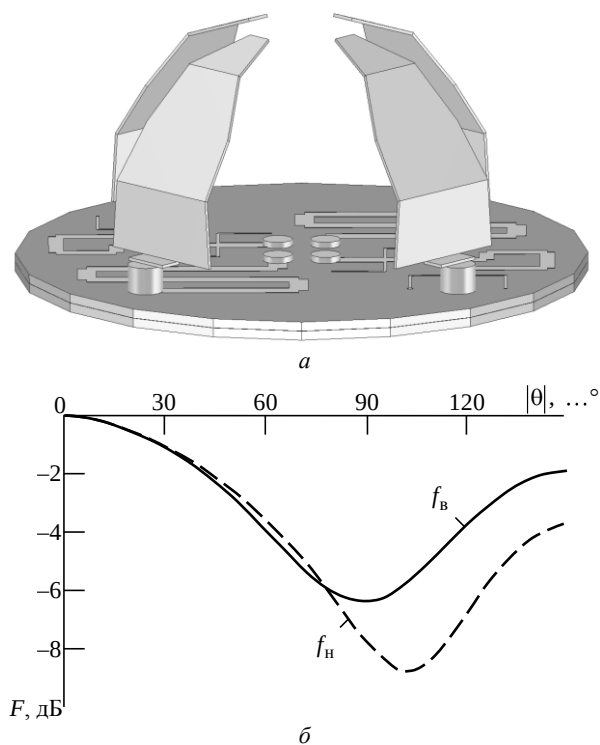


Рис. 2. Модель квадрупольной антенны (а) и ее диаграмма направленности (б)

Fig. 2. Quadrupole antenna model (а) and its radiation pattern (б)

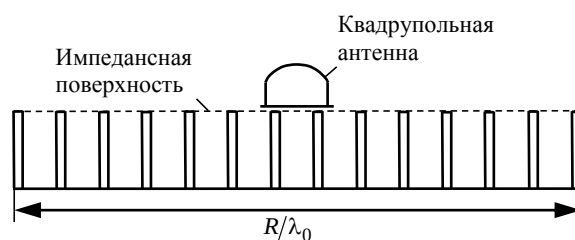


Рис. 3. Квадрупольная антенна с высокоимпедансной поверхностью решетки стержней

Fig. 3. Quadrupole antenna with high-impedance surface of rod array

Одним из параметров, характеризующих устойчивость антенны ГНСС к многолучевой интерференции, является средний коэффициент многолучевости (multipath ratio – MR), определенный как отношение среднего КУ в верхней полусфере $\bar{G}_{\theta \in 0..90^\circ}$ к среднему КУ в нижней полусфере $\bar{G}_{\theta \in 90..180^\circ}$:

$$\overline{MR} = \frac{\bar{G}_{\theta \in 0..90^\circ}}{\bar{G}_{\theta \in 90..180^\circ}}.$$

Коэффициент многолучевости также получен в результате постобработки.

Исследование проведено на верхней $f_B = c/\lambda_H$ и нижней $f_H = c/\lambda_B$ граничных частотах ГНСС. Характеристики представлены в зависимости от диаметра экрана R , нормированного на длину волны R/λ , для верхней ($\lambda = \lambda_B$) и нижней ($\lambda = \lambda_H$) частот диапазона ГНСС. Ввиду симметрии ДН квадрупольной антенны характеристики приведены для углов $\theta \in 0..180^\circ$.

Обсуждение. Анализ зависимости средней крутизны ДН для скользящих направлений от диаметра высокоимпедансного экрана (рис. 4, а) пока-

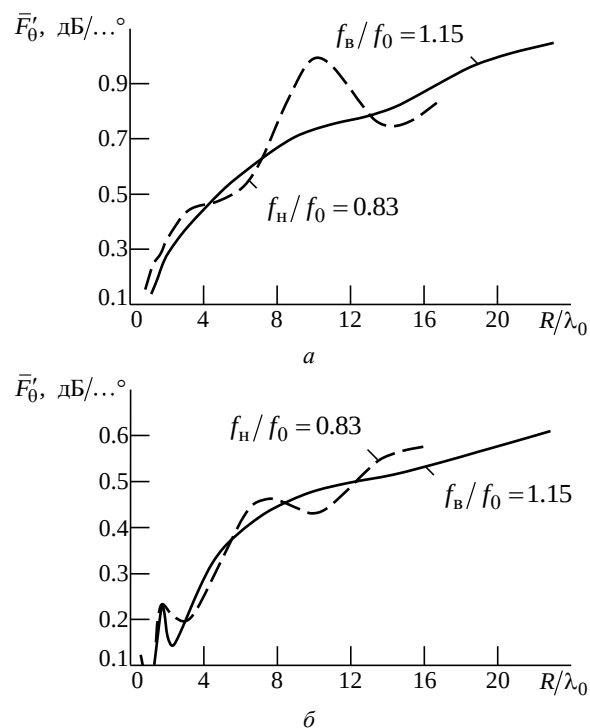


Рис. 4. Зависимость средней крутизны ДН от размера экрана для квадрупольной антенны с HIS (а) и GP (б)

Fig. 4. Dependence of the radiation pattern average steepness on the size for a quadrupole antenna with the high impedance structure screen (a) and the ground plane screen (б)

зывает, что при малых размерах экрана ($R/\lambda \leq 10$) крутизна быстро возрастает с увеличением размера экрана, а при больших размерах ($R/\lambda > 10$) изменяется незначительно. Значения на нижней и верхней границах частотного диапазона ГНСС в области малых R/λ близки, следовательно, запас емкостного импеданса решетки стержней достаточен во всем диапазоне частот. С увеличением диаметра экрана первый минимум ДН (рис. 5, б) вначале перемещается к значению $\theta = 100^\circ$, а затем уменьшается. Этим можно объяснить всплеск зависимости при значении диаметра около 12λ (рис. 4, а), где первый минимум ДН приходится на значение угла $\theta = 100^\circ$. Из частотной зависимости $DU(\theta)$ (рис. 6) следует преимущество экрана диаметра 12λ на f_H . На f_B первый минимум ДН

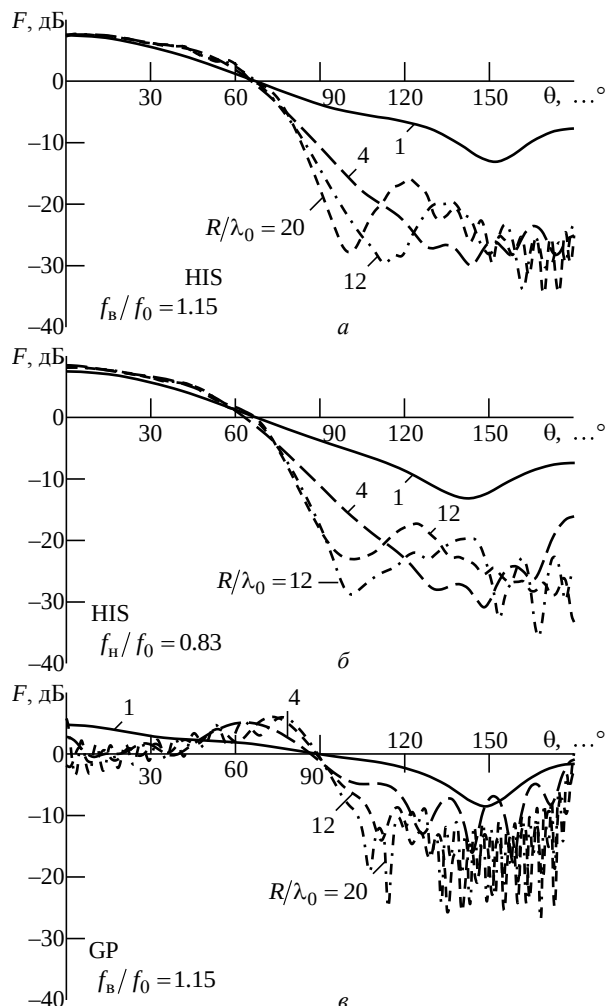


Рис. 5. ДН квадрупольных антенн: а – HIS $f_B/f_0 = 1.15$; б – HIS $f_H/f_0 = 0.83$; в – GP $f_B/f_0 = 1.15$

Fig. 5. Radiation pattern of the quadrupole antennas: а – HIS $f_B/f_0 = 1.15$; б – HIS $f_H/f_0 = 0.83$; в – GP $f_B/f_0 = 1.15$

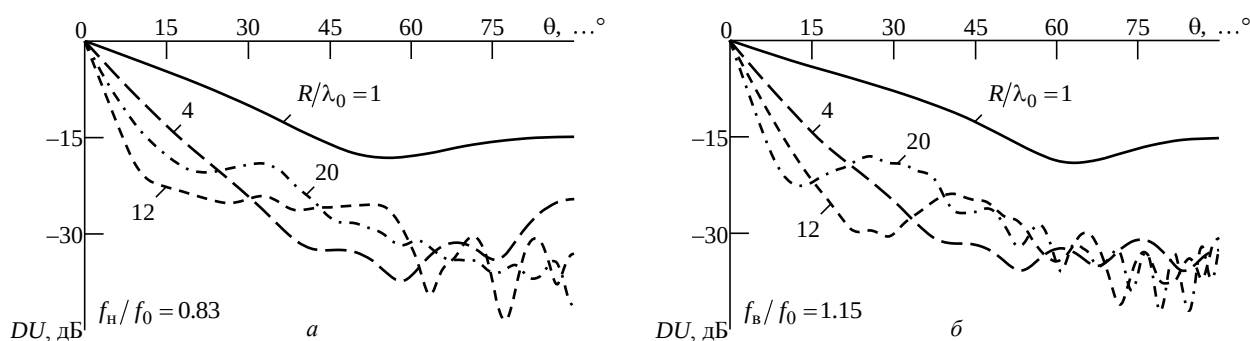


Рис. 6. Отношение ДН и ДООИ квадрупольной антенны с HIS: а – $f_n/f_0 = 0.83$; б – $f_b/f_0 = 1.15$

Fig. 6. Radiation pattern vs backward radiation pattern ratio for the quadrupole antenna with HIS:
а – $f_n/f_0 = 0.83$; б – $f_b/f_0 = 1.15$

(рис. 5, а) при $R/\lambda = 20$ также приходится на значение угла $\theta = 100^\circ$. Причем в этом случае наблюдаются наилучшие DU и крутизна ДН.

Важно отметить фактическое отсутствие воздействия высокоимпедансного экрана на ДН квадрупольной антенны вплоть до угла $\theta \approx 70^\circ$. Для скользящих углов вид ДН значительно изменяется. Как видно из зависимостей коэффициента усиления при скользящих углах $G_{\theta \in \pm 90^\circ}$ от диаметра высокоимпедансного экрана (рис. 7), ход кривых существенно зависит от диаметра и при $R/\lambda = 4 \dots 5$ составляет менее -20 дБ как на верхней, так и на нижней частотах диапазона ГНСС.

Крутизна ДН квадрупольной антенны над проводящим экраном (рис. 5, б) на f_n и f_b изменяется аналогично антенне с высокоимпедансным экраном. Однако в последнем случае значения крутизны ДН при $R/\lambda = 20$ почти вдвое превышают значения для антенны с обычным проводящим экраном. Кроме того, за пределами скользящих углов как в нижней, так и верхней полу-

сфере ДН квадрупольной антенны над проводящим экраном при $R/\lambda > 1$ имеет значительную изрезанность, сформированную противофазными токами кромки экрана (рис. 5, в). Этот факт делает затруднительным применение проводящих экранов больших электрических размеров для квадрупольной антенны. Поэтому характеристики усиления при скользящих углах $G_{\theta \in \pm 90^\circ}$ и DU для антенны над проводящим экраном не приведены. В отличие от квадрупольной антенны применение плоского проводящего экрана большого электрического размера для патч-антенн возможно вследствие малых значений $G_{\theta \in \pm 90^\circ}$ [14, 15].

Для квадрупольной антенны с проводящим экраном увеличение R/λ не сопровождается значительным изменением MR (рис. 8). В случае высокоимпедансного экрана это отношение быстро возрастает и максимально в области значений $R/\lambda = 8$, затем имеет место небольшой спад из-за роста первого бокового лепестка ДН (рис. 5).

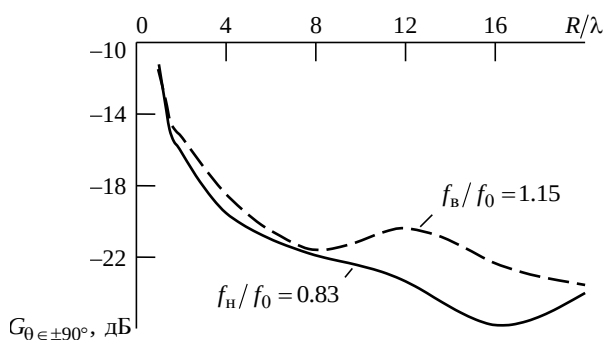


Рис. 7. Коэффициент усиления квадрупольной антенны с HIS на скользящих углах

Fig. 7. The gain of the quadrupole antenna with HIS at sliding angles

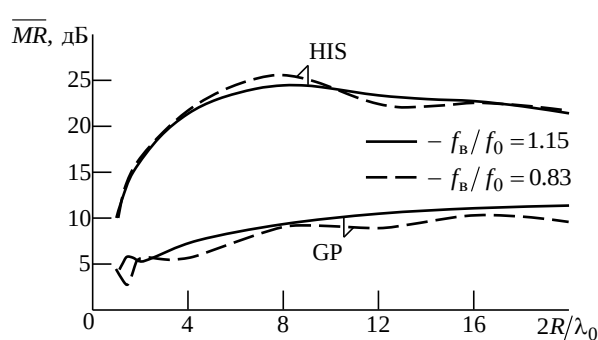


Рис. 8. Средний коэффициент многолучевости исследуемых антенн

Fig. 8. Average multipath of the antennas under study

Закключение. Приведенные результаты исследования показывают, что высокоимпедансный экран диаметром $R/\lambda = 12$ является предпочтительным для квадрупольной антенны. Дальнейшее увеличение экрана лишь незначительно улучшает ее характеристики в области скользящих углов. Тем не менее, как отмечено в [16], подавление отраженного сигнала из нижней полусферы при высоких углах к плоскости экрана прямо пропорционально уровню ДН источника в направлении на экран. Возможности улучшения ДООИ за счет управления шириной ДН для приложений к зада-

чам позиционирования ограничены, так как значительное сужение ДН приводит к опасности срыва слежения за сигналами пригоризонтных спутников. В этой связи с целью увеличения коэффициента усиления при скользящих углах с сохранением диаметра экрана, а значит и крутизны ДН в этой области возможно использование трехмерного (3D) экрана со спадом образующей высокоимпедансной поверхности. В общем случае применение высокоимпедансного экрана диаметром более $R/\lambda = 12$ возможно, если отсутствует габаритное ограничение.

Список литературы

1. Татарников Д. В. Экраны антенн высокоточной геодезии по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Ч. 1: Идеально проводящие и импедансные экраны // Антенны. 2008. № 4 (131). С. 6–19.
2. Mitigation of Multipath through the Use of an Artificial Magnetic Conductor for Precision GPS Surveying Antennas / W. E. McKinzie, R. B. Hurtado, B. K. Klimczak, J. D. Dutton // IEEE Ant. and Prop. Intern. Symp. San Antonio, USA, 16–21 June 2002. Proc. Vol. 4. Piscataway: IEEE, 2002. P. 640–643. doi: 10.1109/APS.2002.1017065
3. Multiband Three Layer GNSS Microstrip Antenna / E. R. Gafarov, A. A. Erokhin, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Ac. № 18756269. 4 p. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729623
4. Multipath Mitigation by Conventional Antennas with Ground Planes and Passive Vertical Structures / D. V. Tatarnikov, V. Filippov, I. Soutiaguine, A. Astakhov, A. Stepanenko, P. Shamatulsky // GPS Solutions. 2005. Vol. 9, iss. 3. P. 194–201.
5. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / ed. by P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Berlin: Springer, 2016. 1206 p. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_4.
6. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th ed. New York: Wiley, 2015. 836 p.
7. Tatarnikov D. V., Astakhov A. V. Large Impedance Ground Plane Antennas for mm-accuracy of GNSS Positioning in Real Time // Progress in Electromagnetics Research Symp. Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013. Proc. P. 1825–1829.
8. Sievenpiper D. F. High Impedance Electromagnetic Surfaces: Ph. D. dissertation / University of California. Los Angeles, 1999. 150 p.
9. Modifications to GPS Reference Station Antennas to Reduce Multipath / A. Kerkhoff, R. B. Harris, C. P. Petersen, A. Pickard // Proc. of the 23d Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Sept. Portland, USA, 21–24, 2010. P. 866–878.
10. Tatarnikov D. V. Topcon Full Wave GNSS Reference Station Antenna with Convex Impedance Ground Plane. URL: https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2011/10/Topcon_PN-A5_antenna_white_paper.pdf (дата обращения 14.10.2020)
11. Periodic Structures, High Impedance and Semitransparent Surfaces in Antennas for Centimeter and Millimeter Precision of Positioning with the Global Navigation Satellite Systems / D. V. Tatarnikov, A. V. Astakhov, A. P. Stepanenko, A. A. Generalov // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1092. Ac. № 012150. 4 p. doi: 10.1088/1742-6596/1092/1/012150.
12. CST STUDIO SUITE 2020 – моделирование трехмерных электромагнитных структур / ООО "Евроинтех". Люберцы, Моск. обл. URL: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml (дата обращения 09.02.2021)
13. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Salomatov Y. P. Broadband Four-Fed Circularly Polarized Quadrupole Antenna // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017. Piscataway: IEEE, 2017. Ac. № 17082594. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998468
14. On Site Validation in GNSS Stations for Multipath and Interference Mitigation Structure / A. Dessantis, L. Dicecca, L. D'Agostina, V. Crino, P. Gabellini, P. Russo, F. A. Fernandez, A. Castro, A. Quiles, R. Weiler // 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 3–5 Dec. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. Ac. № 14947811 doi: 10.1109/NAVITEC.2014.7045137
15. Broadband Capacitively Coupled Stacked Patch Antenna for GNSS Applications / D. Li, P. Guo, Q. Dai, Y. Fu // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 701–704. doi: 10.1109/LAWP.2012.2205129
16. Tatarnikov D. V. Semi-Transparent Ground Planes excited by Magnetic Line Current // IEEE Anten. and Propag. 2012. Vol. 60, iss. 6. P. 2843–2852. doi: 10.1109/TAP.2012.2194636

Информация об авторах

Гафаров Евгений Раисович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009), аспирант, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; антенны ГНСС и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

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

References

1. Tatarnikov D. V. Antenna ground planes for high-precision positioning with the global navigation satellites signals. P. 1. Ideal conducting and impedance ground planes. *Antennas*. 2008, no. 4 (131), pp. 6–19. (In Russ.)
2. McKinzie W. E., Hurtado R. B., Klimczak B. K., Dutton J. D. Mitigation of Multipath through the Use of an Artificial Magnetic Conductor for Precision GPS Surveying Antennas. *IEEE Ant. and Prop. Intern. Symp.* 16–21 June 2002, San Antonio, USA. Proc. Vol. 4. Piscataway: IEEE, 2002. P. 640–643. doi: 10.1109/APS.2002.1017065
3. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Stankovsky A. V., Salomatov Y. P. Multiband Three Layer GNSS Microstrip Antenna. *Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*. 18–20 April 2019, Tomsk, Russia. Piscataway: IEEE, 2019, Ac. no. 18756269, 4 p. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729623
4. Tatarnikov D. V., Fillipov V., Soutiaguine I., Astakhov A., Stepanenko A., Shamatulsky P. Multipath Mitigation by Conventional Antennas with Ground Planes and Passive Vertical Structures. *GPS Solutions*. 2005, vol. 9, iss. 3, pp. 194–201.
5. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Ed. by P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Berlin, Springer, 2016, 1206 p. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_4.
6. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. *GPS Satellite Surveying*. 4th ed. New York, Wiley, 2015, 836 p.
7. Tatarnikov D. V., Astakhov A. V. Large Impedance Ground Plane Antennas for mm-accuracy of GNSS Positioning in Real Time. *Progress in Electromagnetics Research Symp.* Aug. 12–15, 2013, Stockholm, Sweden. Proc., pp. 1825–1829.
8. Sievenpiper D. F. High Impedance Electromagnetic Surfaces. Ph. D. dissertation, University of California. Los Angeles, 1999, 150 p.
9. Kerkhoff A., Harris R. B., Petersen C. P., Pickard A. Modifications to GPS Reference Station Antennas to Reduce Multipath. *Proc. of the 23d Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. September 21–24, 2010. Portland, USA, pp. 866–878.
10. Tatarnikov D. V. Topcon Full Wave GNSS Reference Station Antenna with Convex Impedance Ground Plane. Available at: https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2011/10/Topcon_PN-A5_antenna_white_paper.pdf (accessed 14.10.2020)
11. Tatarnikov D. V., Astakhov A. V., Stepanenko A. P., Generalov A. A. Periodic Structures, High Impedance and Semitransparent Surfaces in Antennas for Centimeter and Millimeter Precision of Positioning with the Global Navigation Satellite Systems. *J. of Physics: Conf. Series*. 2018, vol. 1092, ac. no. 012150, 4 p. doi: 10.1088/1742-6596/1092/1/012150
12. CST MICROWAVE STUDIO 2016. Work flow & Solver Overview. CST MICROWAVE STUDIO, 2016, 124 p. Available at: <https://manualzz.com/doc/28231181/cst-microwave-studio> (accessed 2021/09/02)
13. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Salomatov Y. P. Broadband Four-Fed Circularly Polarized Quadrupole Antenna. *Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*. June 29–30, 2017, Astana, Kazakhstan. Piscataway, IEEE, 2017, ac. no. 17082594. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998468
14. Dessantis A., Dicecca L., D'Agristina L., Crino V., Gabellini P., Russo P., Fernandez F. A., Castro A., Quiles A., Weiler R. On Site Validation in GNSS Stations for Multipath and Interference Mitigation Structure. 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. 3–5 Dec. 2014, Noordwijk, Netherlands. Piscataway, IEEE, 2014, ac. no. 14947811. doi: 10.1109/NAVITEC.2014.7045137
15. Li D., Guo P., Dai Q., Fu Y. Broadband Capacitively Coupled Stacked Patch Antenna for GNSS Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.* 2012, vol. 11, pp. 701–704. doi: 10.1109/LAWP.2012.2205129
16. Tatarnikov D. V. Semi-Transparent Ground Planes excited by Magnetic Line Current. *IEEE Anten. and Propag.* 2012, vol. 60, iss. 6, pp. 2843–2852. doi: 10.1109/TAP.2012.2194636

Information about the authors

Evgeniy R. Gafarov, Master's degree in Radio Engineering (2009), postgraduate, senior lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 30 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; GNSS antennas and antenna arrays.

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

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

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

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

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

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

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.965

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21>

Определение минимального шага сканирования луча фазированной антенной решетки

М. Д. Парнес✉

ООО "Резонанс", Санкт-Петербург, Россия

✉info@antennas.spb.ru

Аннотация

Введение. Антеннам с электронным сканированием уже скоро 100 лет. Методы их проектирования и производства достаточно изучены, однако есть параметры, которые в научно-технической литературе не раскрыты. Одним из таких параметров является минимальный шаг движения и связанный с этим параметр – точность установки луча в заданном направлении. Из электродинамической задачи излучения очевидно, что шаг связан с количеством излучателей и точностью установки фазы в аналоговых фазовращателях (ФВ) либо с шагом квантования в случае использования фазовращателей с дискретным шагом.

Цель исследования. Нахождение связи между конструктивными параметрами фазированной антенной решетки (ФАР) и шагом движения луча. Исследование зависимости шага от параметров фазовращателя и типов диаграммообразующих схем ФАР. Создание математического аппарата для вычисления минимального шага движения луча для суммарной и разностной диаграмм направленности.

Материалы и методы. Аналитические соотношения для расчета шага в зависимости от геометрических размеров ФАР и расположения излучателей. Создание программ для расчета диаграмм направленности и программно-аппаратного комплекса для управления лучом экспериментальной ФАР С-диапазона.

Результаты. Найдена методика вычисления минимального шага сканирования ФАР. Математические соотношения для расчета минимального шага и точности установки луча ФАР. Сравнение экспериментальных и теоретических данных минимального шага движения суммарного и разностного лучей ФАР С-диапазона с соотношением $D/\lambda = 10$ по координате X и $D/\lambda = 5$ по координате Y показало хорошее совпадение.

Заключение. Созданный математический аппарат позволяет точно рассчитать минимальный шаг электронного сканирования луча. Экспериментально измеренные шаги движения луча для решетки из 144 элементов подтверждают полученные аналитические соотношения. В ФАР с небольшим количеством элементов ($N < 10$) минимальный шаг перемещения может быть переменным. Теоретически достижимый минимальный шаг движения луча определяется фазовым сдвигом младшего разряда ФВ и электрической длиной апертуры антенны.

Ключевые слова: сканирование электронное, фазированная антенная решетка, фазовращатели, квантование фазы, шаг движения луча

Для цитирования: Парнес М. Д. Определение минимального шага сканирования луча фазированной антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 15–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.11.2020; принята к публикации после рецензирования 20.12.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



Determining the Minimum Scan Step of an Electronically Scanned Antenna

Michael D. Parnes ✉

Company "Resonance Ltd", St Petersburg, Russia

✉info@antennas.spb.ru

Abstract

Introduction. Electronically scanned antennas (ESA) appeared about a century ago. Although the methods of their design and production have been sufficiently studied, some individual parameters are yet to be revealed. One of such parameters is the minimum step of movement, along with a related parameter – the accuracy of beam alignment in a given direction. From the electrodynamic problem of radiation, it is obvious that the step is associated with the number of radiators and the accuracy of phase adjustment in analogue phase shifters, or with the quantization step in the case of using phase shifters with a discrete step.

Aim. To discover a connection between the design parameters of ESA and the step of beam steering; to investigate the dependence between the step and the parameters of the phase shifter and types of beam forming phased array circuits; to create a mathematical apparatus for calculating the minimum step of beam movement for the sum and difference radiation patterns.

Materials and methods. Analytical relations were determined for calculating the step depending on the geometric dimensions and location of the radiators. A software application was developed for calculating radiation patterns. A software and hardware complex was designed for beam control of an experimental C-band ESA.

Results. A method was developed for calculating the minimum step of ESA scanning. Mathematical relations for calculating the minimum step and accuracy of the ESA beam setting were obtained. A comparison of the experimental and theoretical data on the minimum step of movement of the sum and difference beams of a C-band ESA with the ratio $D/\lambda = 10$ in the X coordinate and $D/\lambda = 5$ in the Y coordinate showed good agreement.

Conclusion. The created mathematical apparatus makes it possible to calculate the minimum step of electron beam scanning with sufficient accuracy. The experimentally measured steps of the beam movement for an array of 144 elements confirmed the obtained analytical relationships. In an ESA with a small number of elements ($N < 10$), the minimum step of movement can be variable. The theoretically achievable minimum step of beam movement is determined by the phase shift of the least significant bit of the phase shifter and the electrical length of the antenna aperture.

Keywords: electronic steering, phased array antenna, phase shifter, phase quantization, electronic scan step

For citation: Parnes M. D. Determining the Minimum Scan Step of an Electronically Scanned Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 15–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-15-21

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

Submitted 17.11.2020; accepted 20.12.2020; published online 25.02.2021

Введение. Антеннам с электронным сканированием уже около 100 лет. Методы их проектирования и производства достаточно изучены [1–5], однако есть параметры, которые в научно-технической литературе не раскрыты. Одним из таких параметров является минимальный шаг движения и связанный с этим параметр – точность установки луча в заданном направлении.

Модель. Из электродинамической задачи излучения очевидно, что шаг движения связан с количеством излучателей и точностью установки

фазы в аналоговых фазовращателях (ФВ) [6]. В антенных решетках с дискретными ФВ [7–9] фронт излучаемой волны формируется кусочно-линейно, идеальная линейная фазовая характеристика аппроксимируется ступенчатой фазовой кривой [10]. Точность аппроксимации фронта определяется минимальным шагом квантования. Минимальным квантом является фазовый сдвиг младшего разряда ФВ, а общее количество квантов определяется количеством фазовращателей и их разрядностью [10]. По величине фазового набегу младшего

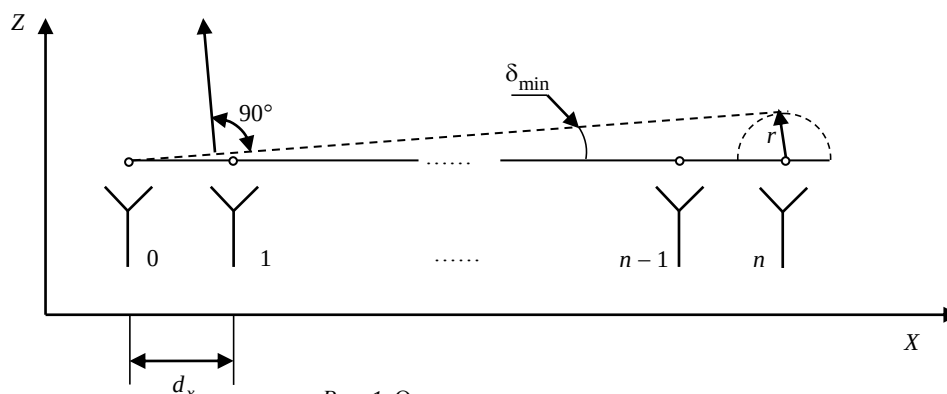


Рис. 1. Одномерная антенная решетка

Fig. 1. One plane phased array

разряда можно определить минимальный шаг движения луча $\delta_{\min}$ из треугольника, в котором известны катет r и гипотенуза Nd_x (рис. 1).

Если r – это расстояние, которое пройдет волна при фазовом набеге φ_l :

$$r = \frac{\varphi_l}{2\pi} \lambda,$$

то отношение катета к гипотенузе позволяет вычислить угол:

$$\sin(\delta_{\min}) = \frac{\varphi_l \lambda}{2\pi Nd_x}, \quad (1)$$

где $\delta_{\min}$ – минимальный угол поворота луча; φ_l – набег фазы младшего разряда ФВ; λ – длина волны; N – максимальное число элементов в решетке; d_x – расстояние между элементами.

Соотношение (1) можно упростить, учитывая, что количество фазовых состояний ФВ

$$2^h = \frac{2\pi}{\varphi_l}, \quad (2)$$

где h – число разрядов ФВ.

Обозначим размер апертуры антенны

$$D = Nd_x. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) из соотношения (1) можно найти угол

$$\delta_{\min} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{D} \frac{1}{2^h}\right). \quad (4)$$

На рис. 2 показано, как изменяется $\delta_{\min}$ в зависимости от количества разрядов при различных электрических размерах антенн.

Соотношение (4) выведено в предположении эквивалентности фронта в виде ступенчатой функции и ее линейной аппроксимации (рис. 1). Для проверки этого предположения требуется выполнить моделирование движения луча, для чего необходимо задать распределение фаз p_n по системе излучателей с номером n вдоль координаты X в соответствии с соотношением [3]

$$p_n(\Theta_0) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \Theta_0 x_n, \quad (5)$$

где Θ_0 – требуемый угол поворота луча; x_n – координата излучателя.

Рассчитаем диаграмму направленности (ДН) [3]

$$F(\theta) = f_r(\theta) \sum_n A_n e^{j[kd_x n \sin \theta + p_n(\Theta)]}, \quad (6)$$

где θ – угол, отсчитываемый от оси Z ; $f_r(\theta)$ – диаграмма направленности излучателя; A_n – напряженность поля излучателя с номером n ; k – волновое число.

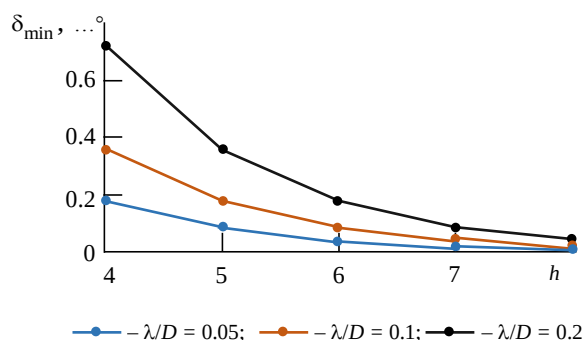


Рис. 2. Зависимость минимального угла движения луча от количества разрядов фазированной антенной решетки

Fig. 2. The dependence between the minimum scan step and the ESA number of bits

Результаты. Вычисление функции $F(\theta)$ по соотношению (6) выполнено с помощью программы расчета антенных решеток Fazar v.5.0 [11]. Эта программа предназначена для проектирования двухмерных (2D) и трехмерных (3D) фазированных антенных решеток (ФАР) с плоскими излучателями. Вычисление диаграммы показывает, что ее изменение при сканировании на угол $\delta_{\min}$ слишком мало, чтобы его можно было использовать для регистрации в режиме точного целеуказания. Например, для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$ изменение уровня при движении луча от $F(\theta)$ до $F(\delta_{\min})$ менее чем 1 %.

В общем случае для диаграммы направленности типа $(\sin u)/u$ (рис. 3) характерна малая крутизна в районе максимума. Такую форму ДН будем называть суммарной [12].

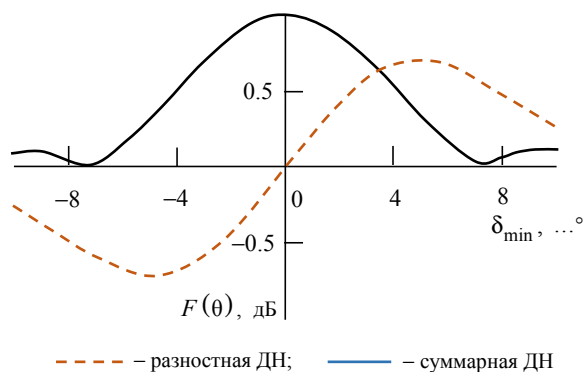


Рис. 3. Суммарная и разностная диаграммы направленности антенной решетки для $\lambda/D = 0.1$

Fig. 3. Sum and different radiation pattern array antenna for $\lambda/D = 0.1$

При работе с суммарной диаграммой направленности $F(\theta)$ (рис. 3) минимальный шаг движения луча δ_{Σ} будет определяться возможностями регистрации сигнала, и если положить, что минимальное изменение величины надежно измеряется для 0.5 дБ [13], то тогда из соотношения $F(\delta_{\Sigma}) = -0.5$ дБ можно вычислить с помощью (6) угол, который составляет $\delta_{\Sigma} = 0.25\theta_{0.5}$ (для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$). Если определить крутизну функции $F(\theta)$ на интервале в одну десятую ширины $\theta_{0.5}$ как производную, то для случая $\frac{\lambda}{D} = 0.1$ она составит:

$$F'_{\Sigma}(0.1\theta_{0.5}) = 0.02.$$

С точки зрения практической реализации и в соответствии с методическими возможностями определение углового положения максимума ДН типа $(\sin u)/u$ возможно с точностью $0.25\theta_{0.5}$ из-за малой крутизны функции $F(\theta)$ в районе максимума [14], т. е. минимальный шаг в несколько раз меньше того, который можно измерить (в 5 раз для $\frac{\lambda}{D} = 0.1$):

$$\delta_{\min} \ll 0.25\theta_{0.5}.$$

Разрешить данное противоречие можно при использовании разностного канала (рис. 3) [12],

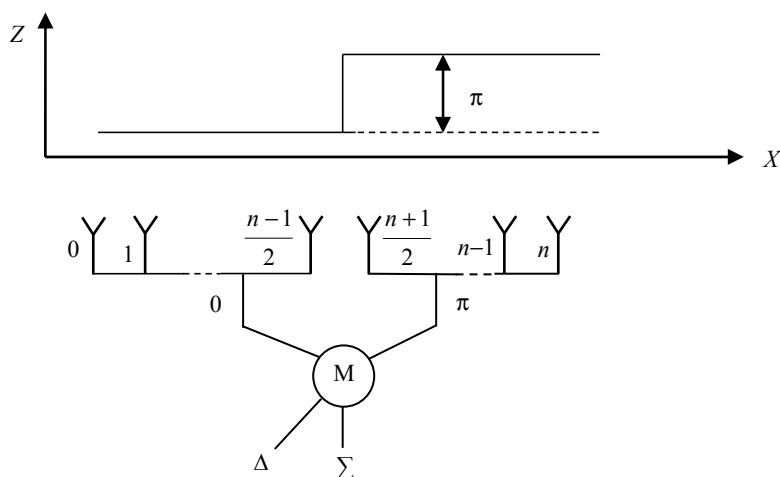


Рис. 4. Схема построения антенной решетки с суммарно-разностной обработкой

Fig. 4. Antenna array block-diagram with sum-difference processing

Состояние	-1	0	0	0	0		0	0	0	0	1
Номер ФВ	1	2				<i>a</i>				<i>n-1</i>	<i>n</i>
Состояние	-1	-1	0	0	0		0	0	0	1	1
Номер ФВ	1	2				<i>b</i>				<i>n-1</i>	<i>n</i>
Состояние	-1	-1	-1	0	0		0	0	1	1	1
Номер ФВ	1	2				<i>в</i>				<i>n-1</i>	<i>n</i>

Рис. 5. Фазовое распределение в излучателях антенной решетки при минимальных шагах движения луча:

a – состояние ON для элементов 1 и *n*; *b* – состояние ON для элементов 1, 2, *n-1*, *n*;

в – состояние ON для элементов 1, 2, 3, *n-2*, *n-1*, *n*

Fig. 5. Phase distribution in the radiators of the antenna array at minimum steps of the beam steering:

a – state ON for element number 1 and *n*; *b* – state ON for element number 1, 2, *n-1*, *n*;

в – state ON for element number 1, 2, 3, *n-2*, *n-1*, *n*

для этого нужно ввести в антенну синфазно-противофазный мост (рис. 4), который добавляет к одной из половин ФАР фазу π [15].

При этом крутизна разностной ДН значительно больше:

$$F'_{\Delta}(0.1\theta_{0.5}) = 0.2.$$

Соотношение (4) для $\delta_{\min}$ можно проверить при сканировании разностной ДН, выполнив аналогичные вычисления: подставив фазовые (5) и амплитудные распределения в (6) с учетом фазовой добавки π (рис. 4). Переключение фазы при минимальных шагах будет происходить последовательно от крайних элементов (рис. 5, *a*), затем к последующим (рис. 5, *b*) и т. д. На рис. 5 принято

для удобства, что предпоследний разряд ФВ соответствует минус первому, т. е., например, для пятиразрядного ФВ $348.75^\circ = -11.25^\circ$.

Существенным отличием фазового распределения, изображенного на рис. 5, от распределения на рис. 1, является его симметрия, что связано с тем, что сканирование должно осуществляться как в положительную, так и в отрицательную сторону углов.

По результатам вычислений (6) построены графики разностной диаграммы направленности $F_{\Delta}^2(\theta)$ для трех углов сканирования (рис. 6), соответствующие фазовым распределениям, показанным на рис. 5, *a-в*. По этим графикам можно определить шаг сканирования луча, а также возможность его измерения. Глубина минимума разностной ДН для построенных лучей различается, а это влияет на точность пеленгации.

Эксперимент. Изложенный подход был применен для анализа ФАР с количеством излучателей $N_x = 18$ и $\frac{D}{\lambda} = 10$. В таблицу сведены результаты расчета по (4), численного моделирования амплитудной диаграммы $F_{\Delta}(\theta)$ по соотношению (6) и результаты измерений положения луча.

Обсуждение. Из анализа данных таблицы можно сделать вывод, что минимальный шаг, полученный по фазовому распределению (рис. 5, *a*), формирует разностную ДН с недостаточно глубоким минимумом и для практического использования более достоверная величина шага составляет $1.5\delta_{\min}$ (4). Еще одно замечание относительно ми-

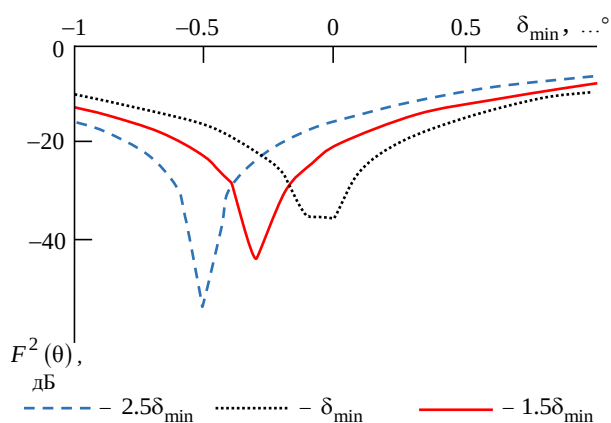


Рис. 6. Разностная диаграмма направленности при различных углах отклонения

Fig. 6. Difference radiation pattern at different turn angles

Результат расчета и измерения шага сканирования
Results of calculations and measurements of the scanning step

Угол сканирования	Соотношение (4), ...°	Фазовое распределение	Соотношение (6), ...°	Результат эксперимента, ...°
$\delta_{\min}$	0.18	1 + 1 ФВ (рис. 5, а)	0.05	< 0.1*
$1.5\delta_{\min}$	0.27	2 + 2 ФВ (рис. 5, б)	0.28	0.3
$2.5\delta_{\min}$	0.05	3 + 3 ФВ (рис. 5, в)	0.50	0.5

* Угол не был измерен, так как цена деления используемого позиционера составляла 0.1°

нимального шага относится к антенной решетке с малым количеством элементов ($N < 10$). Расчеты, произведенные в соответствии с соотношениями (5) и (6), показывают, что, например, для восьми-элементной решетки ($N = 8$) и пятиразрядного ФВ ($h = 5$) шаг будет переменным. Это объясняется тем, что включение двух крайних (рис. 5, а) и двух последующих ФВ (рис. 5, б) приведет к различному результату по отклонению луча, так как в этом случае последний излучатель расположен на расстоянии $4d_x$ от центра, а предпоследний на расстоянии $3d_x$, т. е. отличие по координатам существенное. Для этого случая первый шаг составит 0.2° , а второй шаг – 0.6° (для антенной решетки $\frac{\lambda}{D} = 0.2$). Все описанные расчетные результаты были прове-

рены на ФАР С-диапазона с соотношением $\frac{D}{\lambda} = 10$ по координате X и $\frac{D}{\lambda} = 5$ по координате Y . В антенне использовался пятиразрядный ФВ. Были измерены разностные ДН и определены минимальные шаги луча $\delta_{\min}$ при сканировании в плоскости X при количестве излучателей $N_x = 18$ и плоскости Y ($N_y = 8$). Точность измерений положения луча составляла 0.1° по средне-квадратичному отклонению (СКО), количество точек данных для расчета СКО не менее 20. Отличие измеренных значений минимального шага с теоретическими оценками (табл.) не более 7 %.

Выводы. Теоретически достижимый минимальный шаг движения луча $\delta_{\min}$ определяется фазовым сдвигом младшего разряда ФВ и электрической длиной апертуры антенны $\frac{D}{\lambda}$, как это видно из (4).

В практических конструкциях ФАР минимально достижимый шаг движения луча с учетом аппаратных возможностей регистрирующих приборов $(1.5 - 2)\delta_{\min}$.

В ФАР с небольшим количеством элементов ($N < 10$) минимальный шаг перемещения может быть переменным, зависящим от геометрического положения излучателя, ФВ которого сдвигает фазу на величину младшего разряда.

Список литературы

1. Mailloux R. J., Mailloux R. J. A History of Phased Array Antennas. University of Massachusetts, 2006. P. 567–603. doi: 10.1002/0471783021.ch17
2. Brookner E. Practical Phased-Array Antenna Systems. Boston–London: Artech House, 1991.
3. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
4. Щелкунов С., Фриис Г. Антенны. Теория и практика / под ред. Л. Д. Бахраха. М.: Сов. радио, 1955. 604 с.
5. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
6. Vendik O. G. A phase shifter with one tunable component for a reflectarray antenna / ed. O. G. Vendik, M. D. Parnes // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008. Vol. 50. № 4. P. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
7. Koul S. K., Bhat B. Microwave and millimeter wave phase shifter V. 1. Boston–London: Artech House, 1991. 338 p.
8. Sturdivant R., Quan C., Enson Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Boston–London: Artech House, 2018. 300 p.
9. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ-фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
10. Hansen R. C. Phased array antennas, 2-e ed. Wiley, 2009. 558 p. doi: 10.1002/9780470529188
11. Программа расчета фазированных антенных решеток Fazar v.5. URL: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-Fazar-v.5> (дата обращения 07.02.2021)
12. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
13. Evans G. E. Antenna Measurement Techniques. Boston–London: Artech House, 1990. 239 p.
14. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / под ред. Н. М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985.
15. Rahman H. Fundamental Principles of Radar. CRC Press, 2019. 339 p.

Информация об авторе

Парнес Михаил Давидович – д. т. н. (2011), главный конструктор ООО "Резонанс". Технический руководитель фирмы по производству антенн для безопасности воздушного движения. Автор более 75 научных публикаций. Сфера научных интересов: фазированные антенные решетки, СВЧ-электроника.
Адрес: ООО "Резонанс", ул. Академика Павлова, д. 14А, Санкт-Петербург, 194156, Россия
E-mail: info@antennas.spb.ru

References

1. Mailloux R. J., Mailloux R. J. A History of Phased Array Antennas. University of Massachusetts, 2006, pp. 567–603. doi: 10.1002/0471783021.ch17
2. Brookner E. Practical Phased-Array Antenna Systems. Artech House, Boston–London, 1991.
3. Vendik O. G., Parnes M. D. Electronic scanned antennas. M., SCIENCE-PRESS, 2002, 232 p. (In Russ.)
4. Schelkunoff S., Friis G. Antennas: Theory and Practice. Ed. L. D. Bahraha. M., Sovetskoe radio, 1955, 604 p. (In Russ.)
5. Phased-Array Antenna Design. Ed. D. I. Voskresensky. M., Radiotekhnika, 2003, 632 p. (In Russ.)
6. Vendik O. G. A phase shifter with one tunable component for a reflectarray antenna. Ed. O. G. Vendik, M. D. Parnes. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008, vol. 50, no. 4, pp. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
7. Koul S. K., Bhat B. Microwave and millimeter wave phase shifter V. 1. Artech House, Boston–London, 1991, 338 p.
8. Sturdivant R., Quan C., Enson Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Artech House, Boston–London. 2018, 300 p.
9. Hiza G. S., Vendik I. B., Serebryakova E. A. Microwave phase shifters and switches. M., Radio i svyaz', 1984, 184 p. (In Russ.)
10. Hansen R. C. Phased array antennas, Second edition. Wiley, 2009. 558 p. doi: 10.1002/9780470529188
11. Phased antenna array analysis. Software. Available at: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-Fazar-v.5> (accessed 07.02.2021) (In Russ.)
12. Leonov A. I., Fomichev K. I. Monopulse Radar. M., Radio i svyaz', 1986, 312 p. (In Russ.)
13. Evans G. E. Antenna Measurement Techniques. Artech House, Boston–London, 1990. 239 p.
14. Measurements methods of microwave antennas. Ed. N. M. Ceitlin. M., Radio i svyaz', 1985. (In Russ.)
15. Rahman H., Fundamental Principles of Radar. CRC Press, 2019. 339 p.

Information about the author

Michael D. Parnes, Dr. Sci. (Eng.) (2011), Chief Engineer of company "Resonance Ltd". Technical director of an air traffic safety antenna company. The author of more than 75 scientific publications. Area of expertise: electronic steering antennas, microwave devices.
Address: Company "Resonance Ltd.", 14A Ak. Pavlova St., St Petersburg 194156, Russia
E-mail: info@antennas.spb.ru

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-22-33>

Универсальный алгоритм автофокусировки радиолокационных изображений

А. А. Монаков✉

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург, Россия

✉ a_monakov@mail.ru

Аннотация

Введение. Случайные перемещения фазового центра антенны радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) являются источником фазовых ошибок (ФО) траекторного сигнала, которые приводят к расфокусировке радиолокационного изображения (РЛИ). Для получения качественного РЛИ используются различные алгоритмы автофокусировки. Среди существующих алгоритмов автофокусировки можно выделить группу алгоритмов, которые позволяют оценить ФО посредством нахождения экстремума некоторой функции качества (ФК) РЛИ. Известными вариантами ФК являются, например, энтропия и резкость РЛИ. Для решения задачи поиска экстремума ФК необходимо применять быстрые методы, известные из теории оптимизации, реализация которых средствами бортового вычислителя является сложной задачей.

Цель работы. Синтезировать универсальный и простой в плане вычислений алгоритм автофокусировки, который позволяет применять широкий спектр видов ФК РЛИ без изменения своей структуры.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи предложен алгоритм, основанный на замене выбранной целевой ФК РЛИ на более простую при вычислениях суррогатную ФК, найти экстремум которой можно прямым способом. Данный метод получил в научной литературе название ММ-метода оптимизации. В качестве суррогатной ФК предлагается использовать квадратическую функцию.

Результаты. Синтезированный алгоритм является прямым и не предполагает использование рекурсивных методов поиска оптимального решения, что ускоряет его работу и повышает устойчивость. Алгоритм легко перестраивается под выбранную целевую функцию качества РЛИ. По сравнению с алгоритмом, использующим линейную суррогатную ФК, предлагаемый алгоритм дал среднеквадратическую ошибку (СКО) остаточной ФО, примерно в 1.5 раза меньшую при меньшем на 10 % количестве итераций.

Заключение. Предложенный алгоритм автофокусировки может быть использован в РСА для компенсации ФО. Алгоритм основан на ММ-методе оптимизации квадратичных суррогатных функций качества РЛИ. Результаты математического моделирования подтверждают работоспособность рассмотренного алгоритма при больших значениях фазовых ошибок.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, фазовые ошибки, алгоритм автофокусировки, целевая функция качества, суррогатная функция качества, ММ-метод оптимизации

Для цитирования: Монаков А. А. Универсальный алгоритм автофокусировки радиолокационных изображений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 22–33. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-22-33

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.11.2020; принята к публикации после рецензирования 27.12.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



A Versatile Algorithm for Autofocusing SAR Images

Andrey A. Monakov✉

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI),
St Petersburg, Russia

✉ a_monakov@mail.ru

Abstract

Introduction. Random deviations of the antenna phase centre of a synthetic aperture radar (SAR) are a source of phase errors for the received signal. These phase errors frequently cause blurring of the radar image. The image quality can be improved using various autofocus algorithms. Such algorithms estimate phase errors via optimization of an objective function, which defines the radar image quality. The image entropy and sharpness are well known examples of objective functions. The objective function extremum can be found by fast optimization methods, whose realization is a challenging computing task.

Aim. To synthesize a versatile and computationally simple autofocus algorithm allowing any objective function to be used without changing its structure significantly.

Materials and methods. An algorithm based on substituting the selected objective function with a simpler surrogate objective function, whose extremum can be found by a direct method, is proposed. This method has been referred to as the MM optimization in scientific literature. It is proposed to use a quadratic function as a surrogate objective function.

Results. The synthesized algorithm is straightforward, not requiring recursive methods for finding the optimal solution. These advantages determine the enhanced speed and stability of the proposed algorithm. Adjusting the algorithm for the selected objective function requires minimal software changes. Compared to the algorithm using a linear surrogate objective function, the proposed algorithm provides a 1.5 times decrease in the standard deviation of the phase error estimate, with an approximately 10 % decrease in the number of iterations.

Conclusion. The proposed autofocus algorithm can be used in synthetic aperture radars to compensate the arising phase errors. The algorithm is based on the MM-optimization of the quadratic surrogate objective functions for radar images. The computer simulation results confirm the efficiency of the proposed algorithm even in case of large phase errors.

Keywords: synthetic aperture radar, phase errors, autofocus algorithm, objective function, surrogate objective function, MM optimization

For citation: Monakov A. A. A Versatile Algorithm for Autofocusing SAR Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 22–33. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-22-33

Conflict of interest. The author declares the absence of any conflicts of interest.

Submitted 03.11.2020; accepted 27.12.2020; published online 25.02.2021

Введение. Автофокусировка (АФ) радиолокационных изображений (РЛИ) является важным элементом обработки сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА), поскольку позволяет компенсировать фазовые ошибки (ФО) траекторного сигнала. ФО могут быть вызваны траекторными нестабильностями (ТН) носителя, которые приводят к случайным перемещениям фазового центра антенны бортового радиолокатора, или изменениями оптической длины пути, проходимого сигналом в неоднородном канале распространения.

В настоящее время предложено большое количество алгоритмов автофокусировки [1]. Среди них можно выделить группу, в основе которых лежит компенсация ФО посредством оптимизации некоторой функции качества РЛИ. К таким алгоритмам относятся алгоритмы минимизации энтропии РЛИ [2–4], максимизации контраста РЛИ [5–7] или резкости РЛИ [8–14]. Достоинством этих алгоритмов является целенаправленное оценивание ФО посредством поиска экстремума соответствующей функции качества. Для организации поиска использу-

ются известные алгоритмы теории оптимизации. Недостатком перечисленных алгоритмов является их сложность, которая при ограниченных вычислительных ресурсах значительно увеличивает время нахождения решения.

В некоторых случаях удастся синтезировать прямые алгоритмы, которые позволяют найти решение, минуя стадию поиска. Так в [12, 13] были предложены непараметрические алгоритмы, позволяющие оценить ФО без поиска решения в многомерном векторном пространстве. Это оказалось возможным благодаря тому, что в качестве целевой функции использовалась сравнительно простая функция качества (ФК) – резкость РЛИ. Однако, как показано в [14], данная функция не является наилучшей для эффективного решения задачи АФ, и близким к оптимальной ФК является логарифмическая функция. Однако для этой ФК предложенные в [12, 13] подходы не применимы, поэтому чрезвычайно интересным представляется использование ММ-методов теории оптимизации [15, 16]. Название этой категории методов поиска экстремума ФК происходит от сокращения английских терминов "Majorize – Minimize" для задач минимизации ФК или "Minorize – Maximize" для задач максимизации ФК. ММ-методы состоят в оптимизации суррогатных функций качества (СФК), которые представляют собой простые в вычислительном смысле функции и являются мажорантами (задачи минимизации) или минорантами (задачи максимизации) выбранной целевой ФК. Как доказано в [15–17], ММ-методы позволяют покоординатным поиском эффективно найти истинное решение оптимизационной задачи. Впервые для решения задачи АФ метод оптимизации суррогатных функций качества был предложен в [18]. Суть представленного в [18] алгоритма заключается в замене энтропийной ФК линейной функцией, поверхность которой является касательной плоскостью к ФК в точке, соответствующей решению на предыдущем шаге поиска.

В настоящей статье алгоритм, предложенный в [18], обобщен на квадратические СФК. Задача построения квадратических СФК была рассмотрена в [17], но, к сожалению, найденное в этой работе решение не может быть использовано в целях АФ. Синтезированный в настоящей статье алгоритм допускает прямое решение и не требует применения методов поиска теории оптимизации. Алгоритм позволяет осуществить АФ при любой

дважды непрерывно дифференцируемой ФК. Математическое моделирование показало, что предлагаемый алгоритм дает высокое качество РЛИ даже при больших ФО и по ряду параметров превосходит алгоритм, предложенный в [18].

Математическая модель фазовых ошибок РСА. Пусть невозмущенное движение носителя на интервале синтеза $[0, T]$ должно происходить вдоль единичного вектора $\hat{\mathbf{v}}$, в качестве которого можно принять

$$\hat{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{V}} / \|\bar{\mathbf{V}}\|,$$

где $\bar{\mathbf{V}}$ – среднее значение вектора мгновенной скорости носителя $\mathbf{V}(t)$:

$$\bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{V}(t) dt;$$

$\|\cdot\|$ – норма вектора. При этом радиус-вектор положения фазового центра антенны РСА в пространстве

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(0) + \hat{\mathbf{v}}vt + \delta\mathbf{r}(t),$$

где $v = \|\bar{\mathbf{V}}\|$ – средняя скорость носителя; $\delta\mathbf{r}(t)$ – вектор ТН (рис. 1).

Если светящаяся точка M на поверхности имеет радиус-вектор $\boldsymbol{\rho}$, то расстояние между фазовым центром антенны РСА и точкой в момент времени t

$$R(t) = \|\mathbf{r}(t) - \boldsymbol{\rho}\| = \|\mathbf{r}(0) + \hat{\mathbf{v}}vt + \delta\mathbf{r}(t) - \boldsymbol{\rho}\|, \quad (1)$$
$$t \in [0, T].$$

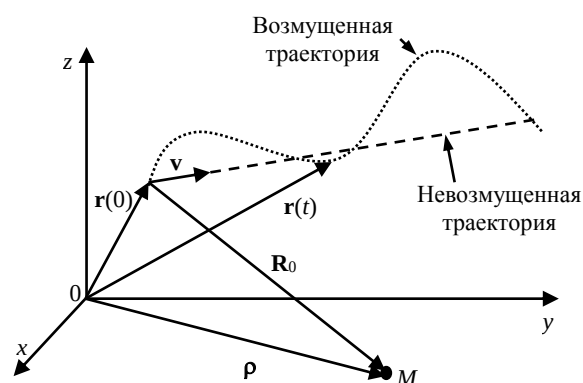


Рис. 1. Геометрия движения РСА
Fig. 1. Geometry of the SAR movement

При этом принимаемый от точки сигнал равен

$$ss(\tau, t) = a\left(\tau - \frac{2R(t)}{c}\right) \exp[-ik_0 R(t)], \quad (2)$$

где τ – "быстрое" время; t – "медленное" время; $a(\tau)$ – комплексная огибающая излучаемого сигнала; c – скорость света; $k_0 = 2\omega_0/c$ – волновое число; ω_0 – круговая несущая частота. Здесь и далее при преобразованиях сигнального массива будем придерживаться обозначений, впервые введенных в [19]. В этих обозначениях первая литера соответствует "быстрому" времени или дальномерной частоте, вторая – "медленному" времени или азимутальной частоте, строчные литеры – сигналу по соответствующему времени, заглавные – спектру по соответствующей частоте.

Преобразование Фурье сигнала (2) по "быстрому" времени

$$Ss(\omega, t) = A(\omega) \exp[-i(k_0 + k)R(t)],$$

где $A(\omega)$ – спектр комплексной огибающей излучаемого сигнала; ω – дальномерная частота; $k = 2\omega/c$ – дальномерное волновое число.

Пусть $\mathbf{R}_0 = \mathbf{r}(0) - \mathbf{p}$, тогда (1) можно переписать в виде

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + v^2 t^2 + \delta r^2(t) + 2(\mathbf{R}_0, \hat{\mathbf{v}})vt + 2(\mathbf{R}_0, \delta \mathbf{r}(t)) + 2(\delta \mathbf{r}(t), \hat{\mathbf{v}})vt},$$

где $R_0 = \|\mathbf{R}_0\|$; $\delta r(t) = \|\delta \mathbf{r}(t)\|$; $(\cdot, \cdot)$ – скалярное произведение векторов. Вынося из-под квадратного корня R_0 и считая, что $vT, \delta r(t) \ll R_0$, получим следующее разложение:

$$R(t) \approx R_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0} + \frac{\delta r^2}{2R_0} + (\hat{\mathbf{R}}_0, \delta \mathbf{r}(t)) + \frac{vt}{R_0}(\hat{\mathbf{v}}, \delta \mathbf{r}(t)) + (\hat{\mathbf{R}}_0, \hat{\mathbf{v}})vt, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{R}}_0 = \mathbf{R}_0 / \|\mathbf{R}_0\|$ – орт в направлении вектора $\mathbf{R}_0$.

Проанализируем слагаемые в разложении (3). Член R_0 не зависит от времени, и ему соответствует постоянный фазовый сдвиг, наличие которого никак не сказывается на качестве РЛИ.

Член $\frac{v^2 t^2}{2R_0}$ называется квадратическим, и его присутствие приводит к расфокусировке РЛИ.

Члены $\frac{\delta r^2}{2R_0}, (\hat{\mathbf{R}}_0, \delta \mathbf{r}(t)), \frac{vt}{R_0}(\hat{\mathbf{v}}, \delta \mathbf{r}(t))$ зависят от ТН, и их присутствие также ведет к расфокусировке РЛИ. Последнее слагаемое $(\hat{\mathbf{R}}_0, \hat{\mathbf{v}})vt$ определяет доплеровскую частоту сигнала от точки M . Таким образом, из перечисленных слагаемых только последнее является полезным. Другие члены необходимо компенсировать для получения качественного РЛИ.

Эта компенсация осуществляется следующим образом:

– двухмерный сигнальный массив $ss(\tau, t)$ подвергается быстрому прямому преобразованию Фурье по "быстрому" времени τ ; в результате получается массив $Ss(\omega, t)$;

– множество строк двумерного массива $Ss(\omega, t)$ разбивается на L полос (подмножеств) по M строк в каждой, и строки каждой полосы умножаются на компенсирующий фазор

$$P_l(t) = \exp \left\{ i(k_0 + k) \left[\frac{v^2 t^2}{2R_{0l}} + \frac{\delta r^2(t)}{2R_{0l}} + (\hat{\mathbf{R}}_{0l}, \delta \mathbf{r}(t)) + \frac{vt}{R_{0l}}(\hat{\mathbf{v}}, \delta \mathbf{r}(t)) \right] \right\},$$

$l = 1, \dots, L,$

где R_{0l} – наклонная дальность до l -й полосы;

– полученный двухмерный массив подвергается быстрому обратному преобразованию Фурье по дальномерной частоте ω .

В итоге получается двухмерный сигнальный массив

$$ss(\tau, t) = a\left[\tau - \frac{2R(t)}{c}\right] \exp[-ik_0 R(t)], \quad (4)$$

в котором произведена компенсация ТН по данным навигационного комплекса.

Отметим, что в (4)

$$R(t) \approx R_0 + (\hat{\mathbf{R}}_0, \hat{\mathbf{v}})vt + \Delta R(t) = R_0 + vt \sin \alpha_0 + \Delta R(t),$$

где $\Delta R(t)$ – некомпенсированные остатки ТН.

Изложенная методика компенсации ТН по навигационным данным не ликвидирует миграций светящихся точек по дальности [19–21]. Компенсация миграций – следующая задача, решение которой является важным этапом улучшения качества РЛИ. В статье этот этап не рассматривается. Однако в результате применения алгоритмов компенсации миграции светящихся точек по дальности получается следующий двумерный сигнал:

$$ss(\tau, t) = ss_0(\tau, t) \exp[i\varphi(t)], \quad (5)$$

$$\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]; t \in [0, T],$$

где $ss_0(\tau, t) = a \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \exp[-ik_0 vt \sin \alpha_0]$ – сигнал РСА при невозмущенном движении носителя; $\varphi(t) = k_0 \Delta R(t)$ – фазовая ошибка; α_0 – угол, под которым точка M видна с борта носителя в начале интервала синтеза; $\sin \alpha_0 = (\hat{\mathbf{R}}_0, \hat{\mathbf{v}})$.

Таким образом, задача АФ – компенсация фазовой ошибки $\varphi(t)$, которая в первом приближении постоянна в пределах интервала "быстрого" времени $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.

Автофокусировка методом ММ-оптимизации. Пусть качество РЛИ

$$I(m, q) = \frac{|sS(m, q)|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} |sS(m, q)|^2},$$

где M и N – количество пикселей по продольной ("быстрое" время) и поперечной ("медленное" время) дальностям соответственно;

$$sS(m, q) = \sum_{n=0}^{N-1} ss(m, n) \exp\left[-i \frac{2\pi}{N} qn\right], \quad (6)$$

$$0 \leq q \leq N-1.$$

Преобразование Фурье (ПФ) сигнала (6) по "медленному" времени можно охарактеризовать ФК

$$F(\varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} f[I(m, q)],$$

где $\varphi = (\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{N-1})$ – вектор отсчетов ФО;

$f(x)$ – локальная ФК, определяющая вклад пикселя $I(m, q)$ в качество РЛИ. Будем считать, что функция $f(x)$, $0 \leq x \leq 1$ является выпуклой, т. е. для любых $x, y \in [0, 1]$ и для любого $t \in [0, 1]$ выполняется

$$f[tx + (1-t)y] \leq tf(x) + (1-t)f(y).$$

При этом алгоритм АФ состоит в поиске оценки вектора ФО:

$$\hat{\varphi} = \arg \min_{\varphi} F(\varphi). \quad (7)$$

Если выбранная ФК $f(x)$ является вогнутой и следует решить задачу максимизации, все результаты статьи остаются справедливыми при замене локальной ФК на $-f(x)$.

Для решения задачи (7) принципиально возможный способ – поиск оценки $\hat{\varphi}$ методами теории оптимизации [22]. Однако ФК является сложной, и применение методов оптимального поиска сопряжено со значительными вычислительными затратами, которые неприемлемы для вычислителя РСА. В связи с этим очень привлекательно использование ММ-методов оптимизации.

ММ-метод, или метод оптимизации суррогатных функций качества (СФК), состоит в замене сложной с точки зрения необходимых вычислений задачи (7) на последовательность более простых задач, которые можно решить прямым способом [15–17]. Это достигается построением последовательности суррогатных функций $G(\varphi; \hat{\varphi}_p)$, $p = 0, 1, 2, \dots$, которые являются мажорантами ФК $F(\varphi)$ на каждом шаге поиска:

$$F(\varphi) \leq G(\varphi; \hat{\varphi}_p),$$

где $\hat{\varphi}_p$ – оценка ФО на p -м шаге.

Если СФК удовлетворяет следующим требованиям [15–17]:

$$1) F(\varphi) \leq G(\varphi; \hat{\varphi}_p) \text{ при любом } \varphi;$$

$$2) F(\hat{\varphi}_p) = G(\hat{\varphi}_p; \hat{\varphi}_p);$$

$$3) \text{grad } F(\varphi) = \text{grad } G(\varphi; \hat{\varphi}_p) \text{ при } \varphi = \hat{\varphi}_p,$$

то последовательность векторов оценок $\hat{\varphi}_p$ при $p \rightarrow \infty$ сходится к минимуму ФК $F(\varphi)$.

Действительно, пусть на p -м шаге получена оценка $\hat{\phi}_p$. Тогда для $(p + 1)$ -го шага будет справедлива следующая цепочка неравенств:

$$F(\hat{\phi}_{p+1}) \leq G(\hat{\phi}_{p+1}; \hat{\phi}_p) = G(\hat{\phi}_{p+1}; \hat{\phi}_p) - G(\hat{\phi}_p; \hat{\phi}_p) + F(\hat{\phi}_p) \leq F(\hat{\phi}_p), \quad (8)$$

где было учтено, что вследствие проведенной на $(p + 1)$ -м шаге минимизации $G(\hat{\phi}_{p+1}; \hat{\phi}_p) \leq G(\hat{\phi}_p; \hat{\phi}_p)$, и в силу условия 2 $G(\hat{\phi}_p; \hat{\phi}_p) = F(\hat{\phi}_p)$.

Таким образом, с каждым шагом алгоритма поиска приближаемся к минимуму ФК. Более того, как отмечено в [15, 16], неравенство (8) свидетельствует о высокой стабильности ММ-алгоритма.

Автофокусировка методом оптимизации квадратичных суррогатных функций. Построим квадратичную СФК

$$g(x; x_0) = a(x_0)x^2 + 2b(x_0)x + c(x_0), \quad (9)$$

$$x, x_0 \in [0, 1],$$

удовлетворяющую перечисленным ранее требованиям. Для этого необходимо, чтобы были выполнены условия:

$$\begin{cases} c = y_0 - 2bx_0 - ax_0^2, \\ b = 0.5y_1 - ax_0, \\ ax^2 + 2bx + c \geq f(x), 0 \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (10)$$

где x_0 – пиксель РЛИ после оптимизации на текущем шаге поиска оценки ФО; y_0, y_1 – значения локальной ФК и ее первой производной в точке x_0 . Первые 2 уравнения системы (10) позволяют определить значения коэффициентов b и c :

$$\begin{cases} b = 0.5y_1 - ax_0, \\ c = y_0 - y_1x_0 - ax_0^2. \end{cases} \quad (11)$$

Подставив эти выражения в (9), получим

$$g(x; x_0) = a(x - x_0)^2 + y_1(x - x_0) + y_0, \quad (12)$$

$$x, x_0 \in [0, 1].$$

Допустим, что локальная ФК $f(x)$ дважды непрерывно дифференцируема. Тогда для нее справедливо следующее разложение в ряд Тейлора:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + 0.5f''(\xi)(x - x_0)^2 = y_0 + y_1(x - x_0) + 0.5f''(\xi)(x - x_0)^2,$$

где $f''(\xi)$ – значение второй производной ФК в некоторой точке $\xi \in [0, 1]$. Следовательно, на основании (12) функция $g(x; x_0)$ будет мажорантой локальной ФК, если

$$a \geq 0.5 \max_{x \in [0, 1]} f''(x). \quad (13)$$

Теперь можно приступить к решению задачи оценки ФО методом оптимизации СФК. Эта задача, как показано далее, имеет конечное аналитическое решение и не требует применения методов численного поиска экстремума СФК.

На основании (5) при наличии ФО сигнальный массив $ss(\tau, t)$ может быть записан в дискретном времени в виде:

$$ss(m, n) = ss_0(m, n) \exp[i\varphi(n)], \\ m = 0, \dots, M - 1; \quad n = 0, \dots, N - 1.$$

Тогда для преобразования Фурье по "медленному" времени получим следующее уравнение:

$$sS(m, q) = \sum_{n=0}^{N-1} z_n ss(m, n) \exp\left[-i \frac{2\pi}{N} qn\right], \quad (14) \\ q = 0, \dots, N - 1$$

где $z_n = \exp[-i\varphi(n)]$, $n = 0, \dots, N - 1$ – фазоры, компенсирующие ФО.

Будем считать, что находимся на p -м шаге алгоритма АФ, когда фазоры $z_k = \exp[-i\varphi(k)]$, $k = 1, \dots, p - 1$ были найдены и ФО компенсированы, и требуется найти следующий p -й, который обозначим $z = z_p = \exp[-i\varphi(p)]$.

Перепишем (14) в следующем виде:

$$sS(m, q) = P_m(q, p) + zQ_m(q, p),$$

где

$$P_m(q, p) = \sum_{n=0}^{p-1} z_n ss(m, n) \exp \left[-i \frac{2\pi}{N} qn \right] + \sum_{n=p}^{N-1} ss(m, n) \exp \left[-i \frac{2\pi}{N} qn \right];$$

$$Q_m(q, p) = ss(m, p) \exp \left[-i \frac{2\pi}{N} qp \right].$$

Найдем такое z , которое соответствует минимуму СФК на текущем шаге. Эта задача является задачей условной оптимизации, поскольку искомое z должно удовлетворять уравнению $|z|^2 = 1$. Решение может быть найдено методом множителей Лагранжа. Введем лагранжиан следующего вида:

$$L(z, z^*) = G(z) + 2\lambda(zz^* - 1) = \sum_{m,q} \left[a_{mq} |sS(q, p)|^4 + 2b_{mq} |sS(q, p)|^2 + c_{mq} \right] + 2\lambda(zz^* - 1), \quad (15)$$

где λ – множитель Лагранжа; коэффициенты СФК a_{mq}, b_{mq}, c_{mq} вычисляются с использованием РЛИ, полученного на предыдущем $(p-1)$ -м шаге, в соответствии с (11–13). Отметим, что коэффициенты c_{mq} не влияют на положение максимума функционала (15), поэтому их можно не учитывать. Дифференцируя (15) по z, z^*, λ и приравнявая производные нулю, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Az^2 + Bz + Cz^* + D = 0; \\ A^* z^{2*} + B^* z^* + C^* z + D^* = 0; \\ zz^* - 1 = 0, \end{cases} \quad (16)$$

где $A = \sum_{m,q} a_{mq} P_{mq}^* Q_{mq} |Q_{mq}|^2$;

$B = \sum_{m,q} a_{mq} |Q_{mq}|^2 (2|P_{mq}|^2 + |Q_{mq}|^2) + a_{mq} |Q_{mq}|^2 + \lambda$;

$C = \sum_{m,q} a_{mq} (P_{mq} Q_{mq}^*)^2$;

$D = \sum_{m,q} a_{mq} P_{mq} Q_{mq}^* (|P_{mq}|^2 + 2|Q_{mq}|^2) + b_{mq} P_{mq} Q_{mq}^*$.

Используя третье уравнение в системе (16), ее можно преобразовать к линейной системе относительно переменных z и z^* . Для этого умножим первое уравнение на z^* , второе на z и учтем,

что $zz^* = 1$. В итоге получим следующую линейную относительно z и z^* систему:

$$\begin{cases} \alpha z + \beta z^* = \gamma, \\ \beta^* z + \alpha z^* = \gamma^*, \end{cases} \quad (17)$$

где $\alpha = |C|^2 - |A|^2$, $\beta = B^* C - A^* D$ и $\gamma = A^* B - C D^*$.

При записи системы (17) было учтено, что α – действительное число.

Решение этой системы

$$\begin{cases} z = (\alpha\gamma - \beta\gamma^*) / (\alpha^2 - |\beta|^2); \\ z^* = (\alpha\gamma^* - \beta^*\gamma) / (\alpha^2 - |\beta|^2). \end{cases} \quad (18)$$

Поскольку множитель Лагранжа λ входит только в выражение для B и этот параметр является чисто действительным числом, будем считать подлежащим нахождению неизвестное B . Найдем его, используя равенство $zz^* = 1$, которое с учетом (18) можно переписать в виде

$$(\alpha^2 - |\beta|^2)^2 = |\alpha\gamma - \beta\gamma^*|^2.$$

Так как неизвестное B входит только в переменные β и γ , удобно произвести нормировку этих переменных к действительному α . В итоге получим уравнение

$$(1 - |b(B)|^2)^2 = |c(B) - b(B)c(B)^*|^2, \quad (19)$$

где $b(B) = \beta/\alpha$ и $c(B) = \gamma/\alpha$.

Несложно показать, что (19) является алгебраическим уравнением 4-й степени относительно неизвестного B :

$$a_0 B^4 + a_1 B^3 + a_2 B^2 + a_3 B + a_4 = 0, \quad (20)$$

где $a_j = L_j - R_j, j = 1, \dots, 4$ и

$$\begin{cases} L_0 = |b_1|^4; \\ L_1 = 4 \operatorname{Re}[b_1 b^*] |b_1|^2; \\ L_2 = 4 \operatorname{Re}^2[b_1 b^*] - 2(1 - |b|^2) |b_1|^2; \\ L_3 = -4(1 - |b|^2) \operatorname{Re}[b_1 b^*]; \\ L_4 = (1 - |b|^2)^2, \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_0 = |b_1|^2 |c_1|^2; \\ R_1 = -2 \operatorname{Re} [b_1^* c_1 (c_1 - b_1 c^* - b c_1^*)]; \\ R_2 = |c_1 - b_1 c^* - b c_1^*|^2 - 2 \operatorname{Re} [b_1^* c_1 (c - b c^*)]; \\ R_3 = 2 \operatorname{Re} [(c^* - b^* c)(c_1 - b_1 c^* - b c_1^*)]; \\ R_4 = |c - b c^*|^2, \end{cases}$$

$$b = b(0), b_1 = b'(0), c = c(0), c_1 = c'(0).$$

Решив (20), получим 4 корня, из которых надо выбрать один, обеспечивающий равенство $zz^* = 1$ и соответствующий минимуму СФК РЛИ.

Таким образом, находятся фазоры z и z^* . Умножая сигнал $ss(m, p)$ на z , получим $ss_0(m, p) = ss(m, p)z$, $m = 0, \dots, M-1$. Этим завершаются вычисления на текущем p -м шаге. Поскольку на каждом шаге решается локальная задача оптимизации, для получения окончательного решения необходимо повторять вычисления по нахождению оценки ФО после прохождения по всем p ($0 \leq p \leq N-1$) до тех пор, пока оценка ФО не перестанет изменяться.

Описанная последовательность вычислений повторяется итерационно, пока оценки ФО на соседних итерациях не будут отличаться более чем на некоторое малое значение $\varepsilon > 0$:

$$\max_{\mathbf{x}} |\hat{\phi}_{p+1}(\mathbf{x}) - \hat{\phi}_p(\mathbf{x})| < \varepsilon. \quad (21)$$

При выполнении условия (21) итерационный процесс завершается.

Автофокусировка методом оптимизации линейных суррогатных функций (алгоритм Крэга). Рассмотрим алгоритм автофокусировки, основанный на максимизации ФК РЛИ с использованием ММ-метода, в котором СФК является линейной и соответствует касательной к ФК [17]. В качестве локальной ФК в [17] была взята квадратичная функция $f(x) = x^2$. Получающийся при таких допущениях алгоритм по количеству вычислений проще рассмотренного выше, поэтому его удобно использовать для оценки качества работы алгоритма, предлагаемого в статье.

Суть алгоритма Крэга заключается в локальной аппроксимации ФК $f(x)$ линейной функцией $y(x; x_0) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) = bx + c$, где

$b = y_1$ и $c = y_0 - y_1 x_0$. При такой аппроксимации, используя тот же подход, что и ранее, найдем z , которое соответствует максимуму СФК на текущем шаге. Решение может быть также найдено методом множителей Лагранжа при лагранжиане следующего вида:

$$L(z, z^*) = F(z) + \lambda (zz^* - 1) = \sum_{m,q} \left[\frac{b_{mq} |P_m(q, p) + z Q_m(q, p)|^2}{+ c_{mq} + \lambda (zz^* - 1)} \right], \quad (22)$$

где λ – множитель Лагранжа; коэффициенты СФК $b_{mq} = 2I_{mq}$ вычисляются с использованием РЛИ, полученного на предыдущем $(p-1)$ -м шаге. Коэффициенты c_{mq} , как и в предыдущем случае, можно не вычислять, так как они не влияют на положение максимума функционала (22).

Выбор линейной СФК значительно упрощает поиск фазора z , так как его нахождение не требует решения алгебраических уравнений. Окончательное решение на p -м шаге имеет вид

$$z = \frac{\sum_{m,q} b_{mq} P_m(q, p) Q_m^*(q, p)}{\left| \sum_{m,q} b_{mq} P_m(q, p) Q_m^*(q, p) \right|}.$$

Как и в предыдущем случае, поиск фазора продолжается до тех пор, пока оценка ФО не перестанет изменяться.

Результаты математического моделирования алгоритма автофокусировки. Для проверки предлагаемого алгоритма использовалось математическое моделирование. В качестве СФК были взяты $f_1(x) = -(x + \beta) \ln(x + \beta)$, $f_2(x) = -\ln(x + \beta)$. СФК $f_1(x)$ требует решения задачи минимизации; СФК $f_2(x)$ – максимизации. Следует отметить, что энтропийная СФК $f(x) = -x \ln x$ имеет особенность в точке $x = 0$, где ее первая $f'(x) = -(1 + \ln x)$ и вторая $f''(x) = -1/x$ производные имеют бесконечное значение. Эта особенность, как показало математическое моделирование, негативно сказывается на сходимости алгоритмов АФ, поэтому данная ФК была заменена на

$f_1(x) = -(x + \beta) \ln(x + \beta)$, где β – максимальное значение РЛИ [14]. Это же значение параметра β было использовано для логарифмической ФК $f_2(x) = -\ln(x + \beta)$.

Результаты моделирования работы алгоритма при энтропийной ФК $f_1(x)$ приведены на рис. 2–5. Для других ФК соответствующие рисунки выглядят аналогично. Сценарные параметры моделирования были выбраны следующими:

- длина волны РСА – 3.2 см;
- период повторения зондирующих импульсов – 0.495 мс;
- отношение сигнал/шум – 20 дБ;
- скорость движения носителя – 50 м/с;
- дальность до ближней к носителю границы РЛИ – 10 км;
- размер РЛИ – 32×512 ;
- СКО траекторных нестабильностей – 0.1 м;
- радиус корреляции траекторных нестабильностей – 1.125 м.

На наблюдаемом участке поверхности были смоделированы 11 светящихся точек со случайными координатами на плоскости "поперечная дальность – продольная дальность" и случайными комплексными амплитудами. Неискаженное траекторными нестабильностями РЛИ приведено на рис. 2. Траекторные нестабильности моделировались отрезком случайного нормального процесса с заданными СКО и радиусом корреляции $\rho = 1.125$ м. На рис. 3 приведено РЛИ, полученное синтезированием апертуры без АФ. Истинная ФО на интервале наблюдения приведена на рис. 4 (штриховая линия). ФО имели высокие значения, поэтому, как следует из рис. 2, РЛИ каждой светя-

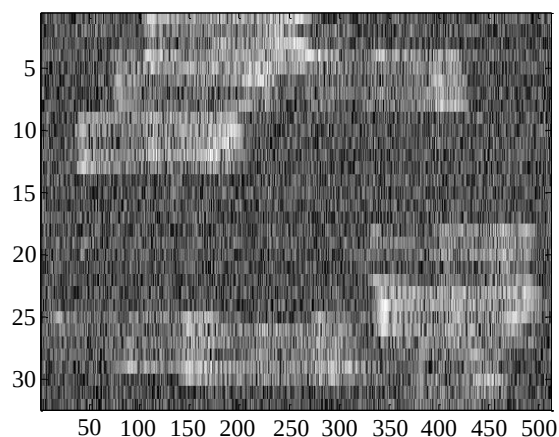


Рис. 3. Радиолокационное изображение с искажениями

Fig. 3. The radar image with blurring

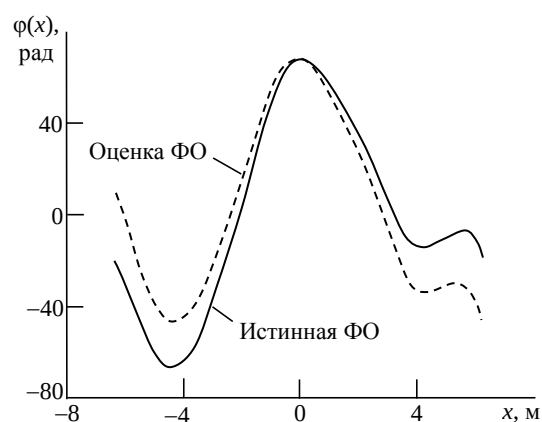


Рис. 4. Истинная фазовая ошибка и ее оценка

Fig. 4. The true phase error and it estimate

щейся точки получились сильно расфокусированными по поперечной дальности. Поскольку миграции светящихся точек по дальности в работе не моделировались, размытие РЛИ светящихся точек по этой координате не наблюдается. Результат оценки ФО предлагаемым алгоритмом приведен на рис. 4 (сплошная линия). Финальное РЛИ,

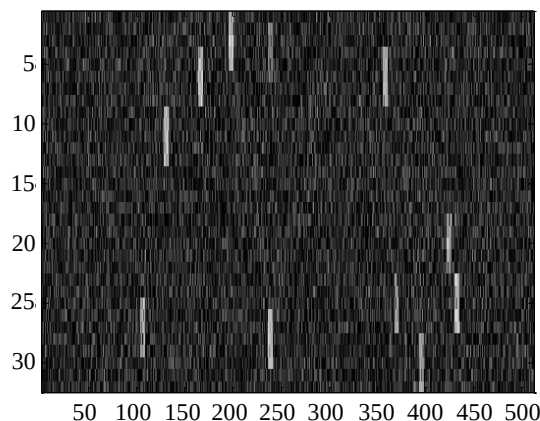


Рис. 2. Радиолокационное изображение без искажений

Fig. 2. The radar image without blurring

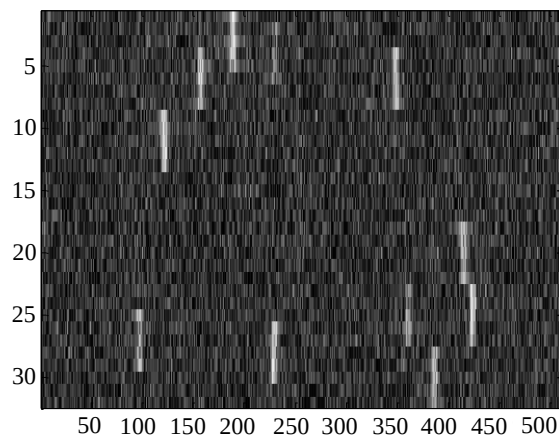


Рис. 5. Восстановленное радиолокационное изображение

Fig. 5. The restored radar image

полученное в результате компенсации ФО, показано на рис. 5. Сравнение рис. 2 и 5 подтверждает правильность работы алгоритма: изображения светящихся точек на финальном РЛИ получились хорошо сфокусированными.

Рассмотрим результаты сравнения предлагаемого алгоритма и алгоритма Крэга. Для проведения сравнительного анализа были смоделированы 100 реализаций ТН с указанными ранее параметрами. Итерационный процесс оценивания ФО останавливался, когда в соответствии с (21) разница между оценками ФО на следующих друг за другом итерациях становилась меньше значения $\varepsilon = \pi/32$. Сравнение алгоритмов проводилось по трем показателям:

- количеству удачных испытаний при восстановлении РЛИ K ;
- СКО остаточной ФО в удачных попытках $\sigma_{\text{ФО}}$;
- среднему количеству итераций в удачных попытках восстановления M .

Попытка восстановления считалась успешной, если СКО остаточной ФО $\sigma_{\text{ФО}}$ было меньше $\pi/4$. Результаты сравнения сведены в таблицу.

Показатели качества алгоритмов АФ
Quality parameters of autofocus algorithms

СФК	K	$\sigma_{\text{ФО}}$, рад	M
Линейная, $f_1(x)$	99	0.003366	6.88
Линейная, $f_2(x)$	100	0.002953	7.11
Квадратичная, $f_1(x)$	100	0.002680	6.32
Квадратичная, $f_2(x)$	100	0.001974	6.62

Как следует из таблицы, свойства предлагаемого алгоритма слабо зависят от выбранной СФК. Однако результаты моделирования, полученные для логарифмической СФК $f_2(x)$, лучше, чем результаты для энтропийной СФК $f_1(x)$. Вместе с тем, по сравнению с алгоритмом Крэга предлагаемый алгоритм дал СКО остаточной ФО $\sigma_{\text{ФО}}$,

примерно в 1.5 раза меньшую при меньшем приблизительно на 10 % количестве итераций M .

Перечисленные свойства являются серьезным доводом в пользу предлагаемого алгоритма. К недостаткам алгоритма следует отнести необходимость решать алгебраическое уравнение четвертой степени. Однако задача нахождения нужного корня этого уравнения значительно упрощается, если учесть, что искомый корень должен быть чисто действительным и положительным.

Заключение. В статье описан универсальный алгоритм автофокусировки, который может быть использован в РСА. Алгоритм основан на ММ-методе оптимизации и позволяет оценить фазовые ошибки, вызванные случайными траекторными неустойчивостями полета носителя РСА, посредством оптимизации квадратичных суррогатных функций качества РЛИ. Параметры квадратичной СФК выбираются таким образом, чтобы она являлась мажорантой (при решении задачи минимизации) или минорантой (при решении задачи максимизации) выбранной целевой функции качества РЛИ. Предлагаемый алгоритм является итерационным и легко перестраивается под выбранную целевую функцию качества. Для этого требуется лишь определить старший коэффициент квадратической суррогатной функции качества. Недостатком предлагаемого алгоритма является необходимость находить положительный действительный корень алгебраического уравнения четвертой степени. Результаты математического моделирования подтверждают работоспособность рассмотренного алгоритма при больших значениях фазовых ошибок. Проведено сравнение предлагаемого алгоритма и алгоритма Крэга, который также использует ММ-метод оптимизации, но при линейных суррогатных функциях качества. Математическое моделирование показало, что предлагаемый алгоритм при использованном в работе сценарии машинного эксперимента более устойчив и дает при примерно на 10 % меньшем количестве итераций оценку фазовых ошибок в 1.5 раза более точную, чем алгоритм Крэга, в котором также используется ММ-метод оптимизации, но при линейной суррогатной функции качества.

Список литературы

1. Cumming I. G., Wong F. H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Boston, MA, USA: Artech House, 2005.
2. Xi L., Guosui L., Ni J. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. Oct. 1999. Vol. AES-35, № 4. P. 1240–1252. doi: 10.1109/7.805442
3. Wang J., Liu X. SAR minimum-entropy autofocus using an adaptive-order polynomial model // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. Oct. 2006. Vol. 3, № 4. P. 512–516. doi: 10.1109/lgrs.2006.878446
4. Zeng T., Wang R., Li F. SAR image autofocus utilizing minimum-entropy criterion // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. 2013. Vol. 10, № 6. P. 1552–1556. doi: 10.1109/lgrs.2013.2261975
5. Berizzi F., Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1996. Vol. AES-32, № 3. P. 1185–1191. doi: 10.1109/7.532282
6. Fortune S. A., Hayes M. P., Gough P. T. Contrast optimization of coherent images // Oceans, Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. № 03CH37492), San Diego, CA, USA. 2003. Vol. 5. P. 2622–2628. doi: 10.1109/oceans.2003.1282986
7. A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation / F. Berizzi, M. Martorella, A. Cacciamano, A. Capria // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. GRS-46, № 10. P. 3053–3062. doi: 10.1109/tgrs.2008.2002576
8. Fienup J. R. Synthetic-aperture radar autofocus by maximizing sharpness // Optics Lett. 2000. Vol. 25, № 4. P. 221–223. doi: 10.1364/ol.25.000221
9. Fienup J. R., Miller J. J. Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics // J. of the Optical Society of America. 2003. Vol. 20, № 4. P. 609–620. doi: 10.1364/josaa.20.000609
10. Morrison R. L., Do M. N., Munson D. C. SAR Image Autofocus by Sharpness Optimization: A Theoretical Study // IEEE Trans. on Image Processing. 2007. Vol. 16, iss. 9. P. 2309–2321. doi: 10.1109/tip.2007.903252
11. Sharpness-based autofocus for stripmap SAR using an adaptive-order polynomial model / Y. Gao, W. Yu, Y. Liu, R. Wang, C. Shi // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. 2014. Vol. 11, № 6. P. 1086–1090. doi: 10.1109/lgrs.2013.2286410
12. Gao Y., Yu W., Liu Y., Wang R. Autofocus algorithm for SAR imagery based on sharpness optimization // Electronics Lett. 2014. Vol. 50, № 11. P. 830–832. doi: 10.1049/el.2013.4111
13. Монаков А. А. Автофокусировка радиолокационных изображений методом максимизации резкости // XXIV Междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, апр. 2018 г. Воронеж, 2018. Т. 3. С. 321–334.
14. Schulz T. J. Optimal Sharpness Function for SAR Autofocus // IEEE Signal Processing Lett. 2007. Vol. 14, № 1. P. 27–30. doi: 10.1109/lsp.2006.881525
15. Lange K., Hunter D. R., Yang I. Optimization transfer using surrogate objective functions // J. of Computational and Graphical Statistics. 2000. Vol. 9, № 1. P. 1–20. doi: 10.2307/1390605
16. Hunter D. R., Lange K. A Tutorial on MM algorithms // The American Statistician. 2004. Vol. 58, № 1. P. 30–37. doi: 10.1198/0003130042836
17. De Leeuw J., Lange K. Sharp quadratic majorization in one dimension // Computational Statistics and Data Analysis. 2009. Vol. 53, № 7. P. 2471–2484. doi: 10.1016/j.csda.2009.01.002
18. Kragh T. J. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus // In Proc. of the Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop, 2006, Lexington, MA, USA, 6–7 June 2006.
19. Precision SAR processing using chirp scaling / R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32, iss. 4. P. 786–799. doi: 10.1109/36.298008
20. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR Processing of highly squinted data using a chirp scaling algorithm with integrated motion compensation // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32, № 5. P. 1029–1040. doi: 10.1109/36.312891
21. Cafforio C., Pratti C., Rocca F. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1991. Vol. AES-27, № 2. P. 194–207. doi: 10.1109/7.78293
22. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 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 150 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; радиолокация; исследование природных сред радиотехническими методами; управление воздушным движением. Адрес: Институт радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67а, Санкт-Петербург, 190121, Россия
E-mail: a_monakov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4469-0501>

References

1. Cumming I. G., Wong F. H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Boston, MA, USA, Artech House, 2005.
2. Xi L., Guosui L., Ni J. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. Oct. 1999, vol. AES-35, no. 4, pp. 1240–1252. doi: 10.1109/7.805442
3. Wang J., Liu X. SAR minimum-entropy autofocus using an adaptive-order polynomial model. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. Oct. 2006, vol. 3, no. 4, pp. 512–516. doi: 10.1109/lgrs.2006.878446.
4. Zeng T., Wang R., Li F. SAR image autofocus utilizing minimum-entropy criterion. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. Nov. 2013, vol. 10, no. 6, pp. 1552–1556. doi: 10.1109/lgrs.2013.2261975
5. Berizzi F., Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. July 1996, vol. AES-32, no. 3, pp. 1185–1191. doi: 10.1109/7.532282
6. Fortune S. A., Hayes M. P., Gough P. T. Contrast optimisation of coherent images. Oceans, Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. no. 03CH37492). San Diego, CA, USA, 2003, vol. 5, pp. 2622–2628. doi: 10.1109/oceans.2003.1282986
7. Berizzi F., Martorella M., Cacciamano A., Capria A. A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. Oct. 2008, vol. GRS-46, no. 10, pp. 3053–3062. doi: 10.1109/tgrs.2008.2002576
8. Fienup J. R. Synthetic-aperture radar autofocus by maximizing sharpness. Optics Lett. 2000, vol. 25, no. 4, pp. 221–223. doi: 10.1364/ol.25.000221
9. Fienup J. R., Miller J. J. Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics. J. of the Optical Society of America. 2003, vol. 20, no. 4, pp. 609–620. doi: 10.1364/josaa.20.000609
10. Morrison R. L., Do M. N., Munson D. C. SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study. IEEE Trans. on Image Processing. 2007, vol. 16, iss. 9, pp. 2309–2321. doi: 10.1109/tip.2007.903252
11. Gao Y., Yu W., Liu Y., Wang R., Shi C. Sharpness-based autofocus for stripmap SAR using an adaptive-order polynomial model. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. June 2014, vol. 11, no. 6, pp. 1086–1090. doi: 10.1109/lgrs.2013.2286410
12. Gao Y., Yu W., Liu Y., Wang R. Autofocus algorithm for SAR imagery based on sharpness optimization. Electronics Lett. May 2014, vol. 50, no. 11, pp. 830–832. doi: 10.1049/el.2013.4111
13. Monakov A. A. Autofocusing of radar images by sharpness maximization. XXIV Intern. scientific conf. "Radiolocation, Navigation and Communication". Apr. 2018, Voronezh, vol. 3, pp. 321–334. (In Russ.)
14. Schulz T. J. Optimal Sharpness Function for SAR Autofocus. IEEE Signal Processing Lett. Jan. 2007, vol. 14, no. 1, pp. 27–30. doi: 10.1109/lsp.2006.881525
15. Lange K., Hunter D. R., Yang I. Optimization transfer using surrogate objective functions. J. of Computational and Graphical Statistics. March 2000, vol. 9, no. 1, pp. 1–20. doi: 10.2307/1390605
16. Hunter D. R., Lange K. A Tutorial on MM algorithms. The American Statistician. 2004, vol. 58, no. 1, pp. 30–37. doi: 10.1198/0003130042836
17. De Leeuw J., Lange, K. Sharp quadratic majorization in one dimension. Computational Statistics and Data Analysis. May 2009, vol. 53, no. 7, pp. 2471–2484. doi: 10.1016/j.csda.2009.01.002
18. Kragh T. J. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus. In Proc. of the Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop, 2006. Lexington, MA, USA, 6–7 June 2006.
19. Raney R. K., Runge H., Bamler R. Cumming I., Wong F. Precision SAR processing using chirp scaling. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. July 1994, vol. 32, no. 4, pp. 786–799. doi: 10.1109/36.298008
20. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR Processing of highly squinted data using a chirp scaling algorithm with integrated motion compensation. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. Sept. 1994, vol. 32, no. 5, pp. 1029–1040. doi: 10.1109/36.312891
21. Cafforio C., Pratti C., Rocca F. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1991, vol. AES-27, no. 2, pp. 194–207. doi: 10.1109/7.78293
22. Gill P. E., Murray W., Wright M. H. Practical optimization. London, New York, Academic Press, 1981. (In Russ.)

Information about the author

Andrey A. Monakov, Dr. Sci. (Eng.) (2000), Professor (2005) of the Department of radio equipment systems of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Honorable Mechanical Engineer of the Russian Federation (2005), Honorable Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; radar theory; microwave remote sensing; air traffic control.

Address: Institute of Radio Engineering, Electronics and Communications, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A Bolshaja Morskaja St., St Petersburg 190121, Russia

E-mail: a_monakov@mail.ru

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

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.317.335.3:551.578.465

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47>

Метод оценки состояния снежно-ледяного покрова по углу Брюстера

В. Г. Машков , В. А. Малышев, П. А. Федюнин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

 mvglaze@mail.ru

Аннотация

Введение. Наиболее сложным и опасным этапом полета вертолета является посадка. Разработка системы обеспечения ее безопасности – в настоящий момент одна из приоритетных задач, решением которой занимается значительное число фирм в нашей стране и за рубежом. Посадка на неподготовленные (необорудованные) площадки со снежно-ледяным покровом может быть вызвана необходимостью доставки подразделений, грузов и боеприпасов в боевых условиях, поисково-спасательными операциями, эвакуацией пострадавших и т. д.

Цель работы. Разработка метода дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по результатам наклонного зондирования подстилающей поверхности радиосигналом с вертикальной поляризацией.

Материалы и методы. Численное моделирование в среде MatLab коэффициентов отражения Френеля эхосигналов с вертикальной поляризацией в интервале зондирования от 40 до 90° в рабочем диапазоне частот при решении прямой и обратной задач реконструкции параметров слоев снежно-ледяного покрова.

Результаты. Получены интервалы значений угла Брюстера, при котором значение коэффициента отражения Френеля от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова минимально. Так, для сухого снега – 47...55°, сухого фирна – 55...58° и сухого льда – 58...61°. Методическая погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев по углам Брюстера составляет не более 3 %. Разрешающая способность по глубине при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с частотой от 2 до 8 ГГц составляет около 4 см.

Заключение. Значение погрешности оценки измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости и глубин k слоев при возрастании значений СКО уровня шума от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышает 10 %. Это свидетельствует о правомерности использования данного метода, реализация которого позволяет автоматизировать процесс оценки возможности выполнения посадки, тем самым снизив время принятия решения и повысив уровень безопасности.

Ключевые слова: состояние снежно-ледяного покрова, подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, идентификация слоев, наклонное зондирование

Для цитирования: Машков В. Г., Малышев В. А., Федюнин П. А. Метод оценки состояния снежно-ледяного покрова по углу Брюстера // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 34–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47

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

Статья поступила в редакцию 30.10.2020; принята к публикации после рецензирования 23.01.2021; опубликована онлайн 25.02.2021

A Method for Assessing the State of the Snow and Ice Cover by the Brewster Angle

Viktor G. Mashkov✉, Vladimir A. Malyshev, Pavel A. Fedyunin

Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy
named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russia

✉mvglaze@mail.ru

Abstract

Introduction. Landing is the most challenging and dangerous part of the helicopter flight. The development of systems facilitating safe landing is a priority task for both Russian and foreign engineering companies. Landing on unprepared sites covered with snow and ice may be determined by the need to deliver cargo and ammunition in combat conditions, during search and rescue operations, evacuations of victims, etc.

Aim. Development of a method for remote assessment of the snow and ice cover based on the results of oblique sensing of the underlying surface with a radio signal with vertical polarization.

Materials and methods. In the MatLab environment, the authors conducted numerical simulations of Fresnel reflection coefficients of echo signals with vertical polarization in the 40–90 degree sensing range in the operating frequency range when solving the direct and inverse problem of reconstruction of the parameters of snow and ice layers.

Results. Intervals of the Brewster angle values were obtained-at which the value of the Fresnel reflection coefficient from the boundaries of the snow and ice cover takes minimal. Thus, was found to be – 47...55°, – 55...58° and – 58...61° for dry snow, dry firn and dry ice, respectively. The depth resolution when using an ultra-wideband LFM signal with a frequency from 2 to 8 GHz is about 4 cm. The methodological error in determining the dielectric permittivity of layers by the Brewster angle comprises not more than 3 %.

Conclusion. The error in determining the relative permittivity and the depth of k layers under an increase in the RMS values of the noise level from 3.8 to 4.8 with a step of 0.1 for 100 implementations of each with a probability of 0.95 does not exceed 10 %, which confirms the validity of this method. The implementation of which allows you to automate the process of evaluating the possibility of a safe landing, thereby reducing the decision-making time and increasing the level of safety.

Keywords: snow and ice cover, underlying surface, permittivity, layer identification, oblique sensing

For citation: Mashkov V. G., Malyshev V. A., Fedyunin P. A. A Method for Assessing the State of the Snow and Ice Cover by the Brewster Angle. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 34–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47

Conflict of interest. The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Submitted 30.10.2020; accepted 23.01.2021; published online 25.02.2021

Введение. Дистанционное зондирование подстилающей поверхности места посадки воздушного судна вертолетного типа (ВСВТ) [1] в виде снежно-ледяного покрова, представляющего собой многослойную структуру, для оценки его состояния – едва ли не единственно оправданный способ с точки зрения выполнения безопасной посадки на неподготовленные (необорудованные) площадки. Задача оценки состояния снежно-ледяного покрова сводится, во-первых, к идентификации его слоев (снег, фирн, лед), поскольку количество слоев снежного и ледяного покрова, формируемых в естественной

среде, будет различным, что связано с их формированием в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий и т. д., определяющихся комплексом гидрометеорологических условий; во-вторых, к определению глубины снежного и толщины ледяного покрова, что является ключевым фактором при принятии решения на посадку ВСВТ на неподготовленную (необорудованную) снежно-ледяную площадку [2].

Посадка на водоем с глубиной снежного покрова выше допустимой или с толщиной ледяного покрова ниже допустимой в соответствии с типом ВСВТ может привести к проваливанию под снег,

лед или к опрокидыванию ВСВТ¹ днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях (туман, дымка, дождь, снег, запыленность или задымленность атмосферы), а также в условиях поднятого снега его вращающимся винтом [5–7].

Вычисление комплексной относительной диэлектрической проницаемости материалов с потерями в СВЧ-диапазоне [8–11] основано на измерении зависимости коэффициента отражения Френеля плоского образца материала от угла падения в пределах $\theta = 40...90^\circ$, когда электрическое поле волны параллельно плоскости падения, после чего по графику зависимости коэффициента отражения Френеля от угла падения определяют угол Брюстера θ_B , а относительную комплексную диэлектрическую проницаемость ε образца материала или участка поверхности земли рассчитывают по формуле $\varepsilon = (\tan \theta_B)^2$.

Поскольку снежно-ледяной покров представляет собой многослойную структуру с различными плотностями, долями содержания воды и собственными структурами, важно определить границы раздела слоев "воздух–снег" (air–snow), "снег–лед" (snow–ice), "лед–вода" (ice–water). Получить пики эхосигналов от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова в результате контраста комплексных относительных диэлектрических проницаемостей слоев не всегда возможно, поскольку если снег неоднородный, уплотняющийся к низу так, что на границе s–i $\varepsilon_s \approx \varepsilon_i$, то отражение от границы s–i вообще отсутствует [3]. Но, как правило, снежный покров имеет слои с различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями, увеличивающимися в глубину. Это связано с их уплотнением в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий и т. д., что позволяет получать эхосигналы от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова. При этом, например, для пресноводного льда (при $\lambda = 3$ см) амплитуда эхосигнала от границы i–w будет больше, чем от границы s–i. Такое наблюдается при толщине ледяного покрова менее 1.6 м⁴.

На территории Российской Федерации толщина ледяного покрова на реках и озерах изменяется от 0.1 м в южных районах до 3 м в полярной зоне Сибири и до 4 м на наледных участках рек

Восточной Сибири. В большинстве случаев, особенно для сильносоленых морских льдов, толщина не превышает 2 м⁴.

Прямая задача. Зависимость коэффициента отражения Френеля с вертикальной поляризацией R_v от комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ε_r и угла зондирования в пределах $\theta = 40...90^\circ$ имеет ярко выраженный минимум значений по сравнению с зависимостью коэффициента отражения Френеля с горизонтальной поляризацией R_h .

Коэффициент отражения [4] от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова определяется [9] углом зондирования и относительной диэлектрической проницаемостью соответствующего слоя:

$$R_{v1,2} = \frac{\left\{ \varepsilon_{r2} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_{r1} [\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} (\sin \theta_1)^2]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{r2} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_{r1} [\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} (\sin \theta_1)^2]} \right\}};$$

$$R_{v2,3} = \frac{\left\{ \varepsilon_{r3} \cos \theta_2 - \sqrt{\varepsilon_{r2} [\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} (\sin \theta_2)^2]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{r3} \cos \theta_2 + \sqrt{\varepsilon_{r2} [\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} (\sin \theta_2)^2]} \right\}};$$

$$\dots$$

$$R_{vi,i+1} = \frac{\left\{ \varepsilon_{ri+1} \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_{ri} [\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri} (\sin \theta_i)^2]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{ri+1} \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{ri} [\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri} (\sin \theta_i)^2]} \right\}}, \quad (1)$$

где θ_1 – угол зондирования;

$$\theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 / \sqrt{\varepsilon_{r2}});$$

$$\theta_i = \arcsin(\sin \theta_1 / \sqrt{\varepsilon_{ri}}).$$

Суммарный коэффициент отражения (1) от снежно-ледяного покрова без учета многократных отражений между границами слоев определяется по рекуррентной формуле [9]:

$$R_{vi,k} = \frac{R_{vi,i+1} + R_{vi+1,k} \exp(-j4\pi h_{i+1} / \lambda \sqrt{\varepsilon_{ri+1}})}{1 + R_{vi,i+1} R_{vi+1,k} \exp(-j4\pi h_{i+1} / \lambda \sqrt{\varepsilon_{ri+1}})}, \quad (2)$$

где h_{i+1} – глубина (i+1)-го слоя; λ – длина волны зондирующего сигнала; k – количество слоев СЛП; $R_{vi,i} = 0$, $k \neq i$, $k \neq i+1$.

¹ Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и

выполнение полетов в гражданской авиации РФ"». URL: <https://base.garant.ru/196235/> (дата обращения 27.10.2020)

Скорость распространения электромагнитной волны (ЭМВ) в снежно-ледяном покрове ниже скорости распространения в воздухе и зависит от его плотности, доли содержания воды и структуры. Для сухого снега (**dry snow**) $v_{ds} = 278.1...212.7$ м/мкс, сухого фирна (**dry firn**) $v_{df} = 212.7...189.0$ м/мкс и сухого льда (**dry ice**) $v_{di} = 189.0...167.9$ м/мкс. Эти значения весьма заметно изменяются в зависимости от доли содержания воды (для чистой воды (**pure water**) $v_{pw} = 32.74...41.97$ м/мкс), преимущественной ориентировки и формы включений льда и воздуха в снеге [6, 12], поэтому необходимо учитывать изменения длины волны при прохождении слоев снежно-ледяного покрова.

Учитывая эти изменения в (2), получаем:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{v1,3} &= \frac{R_{v1,2} + R_{v2,3} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,3} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v1,4} &= \frac{R_{v1,2} + R_{v2,4} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,4} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v2,4} &= \frac{R_{v2,3} + R_{v3,4} \exp(\gamma_{r2})}{1 + R_{v2,3} R_{v3,4} \exp(\gamma_{r2})}; \\ R_{v1,5} &= \frac{R_{v1,2} + R_{v2,5} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,5} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v2,5} &= \frac{R_{v2,3} + R_{v3,5} \exp(\gamma_{r2})}{1 + R_{v2,3} R_{v3,5} \exp(\gamma_{r2})}; \\ R_{v3,5} &= \frac{R_{v3,4} + R_{v4,5} \exp(\gamma_{r3})}{1 + R_{v3,4} R_{v4,5} \exp(\gamma_{r3})}; \\ &\dots \end{aligned} \right.$$

где $\gamma_1 = -j \frac{4\pi h_{r2}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{r2}}}$; $\gamma_2 = -j \frac{4\pi h_{r3}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{r3}}}$; ...;
 $\gamma_i = -j \frac{4\pi h_{ri+1}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{ri+1}}} = -j \frac{4\pi H_{ri+1}}{\epsilon_{ri+1}}$; $H_{ri+1} = \frac{h_{ri+1}}{\lambda_{ri+1}}$ – относительная глубина $(i+1)$ -го слоя;
 $\lambda_{ri+1} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ri+1}}}$ – длина волны в слое.

Если зондирующий сигнал падает на границу раздела двух диэлектриков под углом θ_1 , равным

углу Брюстера θ_B , то отраженный θ_1' и преломленный θ_2 сигналы перпендикулярны: $\theta_1' + \theta_2 = 90^\circ$ (рис. 1). При этом отраженный сигнал будет полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (отсутствует), а степень поляризации преломленного луча будет максимальной.

Согласно закону Снеллиуса для волны с углом падения θ_1 и углом преломления θ_2 на границе двух диэлектриков для исследуемых сред ($\mu = 1$: снег, фирн, лед) справедливо равенство

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}}, \quad (3)$$

где n_2, n_1 – показатели преломления первого и второго слоев среды; $n_{2,1}$ – показатель преломления границы раздела первого и второго слоев; ϵ_1 и ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости первого и второго слоев соответственно.

Угол Брюстера

$$\theta_B = \arctg(n_{2,1}) = \arctg\left(\frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}}\right).$$

Угол Брюстера для i -й границы раздела слоев, при котором отсутствует отраженный сигнал с вертикальной поляризацией от i -й границы раздела слоев:

$$\theta_{B,i+1} = \arctg(n_{i+1,1}),$$

где $n_{i+1,1} = n_{i+1} / n_1$ – показатель преломления i -й границы раздела слоев. Тогда

$$\theta_{B,i+1} = \arctg\left(\frac{n_{i+1}}{n_1}\right) = \arctg\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_1}}\right), \quad (4)$$

при этом угол зондирования первого слоя подстилающей поверхности $\theta_{B,i+1} \neq \theta_{B,k}$. Показатель преломления i -й границы раздела слоев возрастает в глубину с ростом плотности снежного покрова.

Согласно предложенному методу зондирования радиосигналом с вертикальной поляризацией контролируемого участка снежно-ледяного покрова в пределах $\theta = 40...90^\circ$ позволяет определить зависимость коэффициентов отражения Френеля $R_{vi,i+1}$.

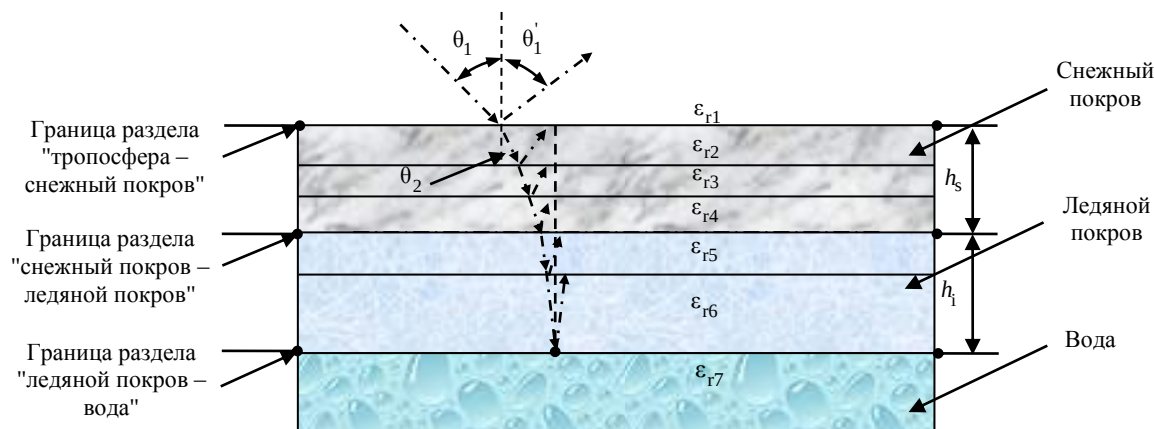


Рис. 1. Преломление ЭМВ в снежно-ледяном покрове

Fig. 1. EMW refraction in snow-ice cover

($i, i + 1$)-границ раздела слоев от угла падения радиоволны (рис. 1).

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для слоев с различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями от угла зондирования в интервале $\theta = 40 \dots 90^\circ$. Увеличение электрической проводимости для морской воды ($\epsilon_{r7} = 74 - j$) объясняется наличием солености $S_{sw} = 35$ г/кг.

Таким образом, интервалам плотностей снежно-ледяного покрова будут соответствовать интервалы углов Брюстера. Так для сухого снега (**dry snow**) $\rho_{ds} = 100 \dots 500$ кг/м³ ($\epsilon'_{ds} = 1.162 \dots 1.984$) – $\theta_{Bds} = 47 \dots 55^\circ$, сухого фирна (**dry firm**) $\rho_{df} = 500 \dots 700$ кг/м³ ($\epsilon'_{df} = 1.984 \dots 2.510$) – $\theta_{Bdf} = 55 \dots 58^\circ$, сухого льда (**dry ice**) $\rho_{di} = 700 \dots 917$ кг/м³ ($\epsilon'_{di} = 2.510 \dots 3.179$) – $\theta_{Bdi} = 58 \dots 61^\circ$. С увеличением содержания влаги значения углов Брюстера смещаются к значениям для воды. Для морской воды с $\epsilon_{sw} = 74$ (sea water) и соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг это $\theta_{Bsw} = 83^\circ$, а для чистой (талой) воды с $\epsilon_{pw} = 87$ (pure water) – $\theta_{Bpw} = 84^\circ$.

Глубины слоев снежно-ледяного покрова измеряют следующим образом.

Геометрические параметры слоев снежно-ледяного покрова. Зондирование контролируемого участка снежно-ледяного покрова осуществляется

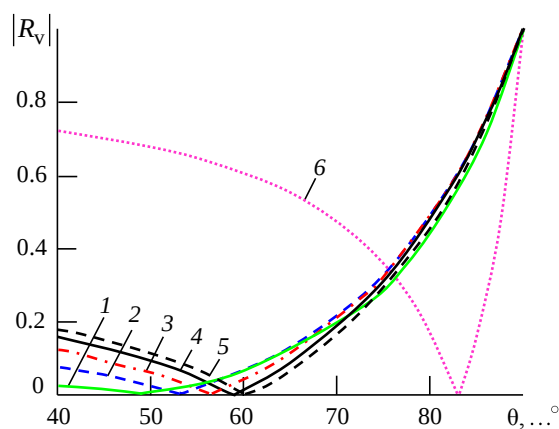


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для слоев с комплексными

относительными диэлектрическими проницаемостями: 1 – $\epsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, 2 – $\epsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$, 3 – $\epsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, 4 – $\epsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$, 5 – $\epsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, 6 – $\epsilon_{r7} = 74 - j$ от угла зондирования в интервале $\theta = 40 \dots 90^\circ$

Fig. 2. The dependence of the coefficient of Fresnel reflection $R_{vi,i+1}$ for layers with complex relative permittivity:

1 – $\epsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, 2 – $\epsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$, 3 – $\epsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, 4 – $\epsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$, 5 – $\epsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, 6 – $\epsilon_{r7} = 74 - j$

from the sounding angle in the interval $\theta = 40 \dots 90^\circ$

линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом [13, 14], реализующим частотный принцип определения глубин слоев снежно-ледяного покрова, основанный на выделении частоты биения разностного сигнала, получаемого при перемножении принятого и зондирующего (опорного) сигналов.

Передающее устройство формирует ЛЧМ-сигнал с частотой

$$f_{tx}(t) = f_0 + \alpha t_m, \forall 0 < t_m < T_m, \quad (5)$$

где $f_0 = 2$ ГГц – начальная частота; $\alpha = 600$ ГГц/с – скорость изменения частоты (крутизна ЛЧМ-сигнала); t_m – время в течение отдельного периода модуляции ЛЧМ-сигнала (быстрое время), а $T_m = 10$ мс – период модуляции (ЛЧМ-сигнала). Прием эхосигналов выполняется приемным устройством с частотой

$$f_{rx}(t) = f_0 + \alpha(t_m - \tau), \forall \tau < t_m < T_m. \quad (6)$$

При этом необходимо отметить требование к формированию ЛЧМ-сигнала в передающем устройстве: постоянная амплитуда сигнала на выходе и высокая линейность частотно-временной зависимости.

Принятый эхосигнал от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова содержит информацию о толщине слоев h_{ti} и имеет временную задержку τ_{ti} , определяемую выражением

$$\tau_{ti} = 2h_{ti}/v_{ti}, \quad (7)$$

где v_{ti} – скорость распространения ЭМВ (рис. 3) в i -м слое снежно-ледяного покрова [6, 11].

Частотная составляющая биения f_b непосредственно связана с задержкой эхосигнала (7) и является разницей (5) и (6):

$$f_b = f_{tx} - f_{rx} = \alpha \tau_{ti} = 2h_{ti}B/(v_{ti}T_m), \quad (8)$$

где B – ширина полосы ЛЧМ-сигнала.

Глубины слоев снежно-ледяного покрова определяются возникающей разностью расстояний из (8), которые проходят зондирующие сигналы:

$$h_{ti} = f_b v_{ti} T_m / (2B)$$

при нормальном зондировании к подстилающей поверхности.

Суммарная временная задержка (рис. 4), без учета многослойности снежного и ледяного покрова, τ_d до границы раздела сред "лед–вода"

τ_{iw} в общем виде определяется так:

$$\tau_d = \tau_{iw} = \tau_{as} + \tau_s + \tau_i = \frac{2h_a}{c} + \frac{2h_s}{v_s} + \frac{2h_i}{v_i},$$

где τ_{as} – временная задержка до границы раздела среды "воздух–снег"; τ_s, τ_i – временные задержки в снежном и ледяном покровах соответственно; h_a – расстояние от ВСВТ до границы раздела сред "воздух–снег"; h_s – глубина снежного покрова; h_i – толщина ледяного покрова; c, v_s, v_i – скорости распространения ЭМВ в свободном пространстве, снеге и льде соответственно.

Для повышения точности измерения глубины снежного и толщины ледяного покрова, при восстановлении структуры подстилающей поверхности (реконструкции параметров слоев [15]) необходимо учитывать скорость распространения ЭМВ [6, 11] в каждом слое среды (7).

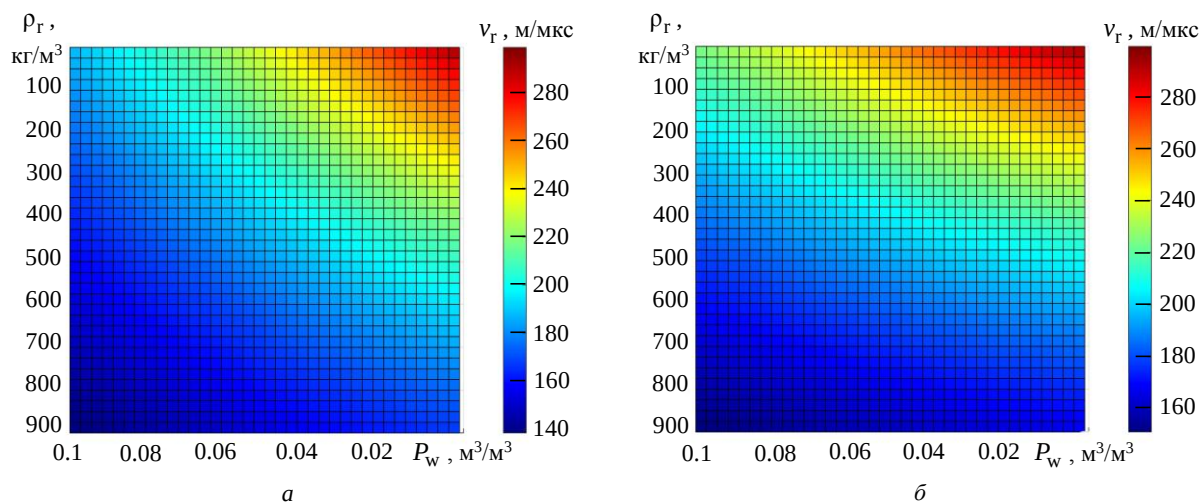


Рис. 3. Двумерное распределение скорости распространения ЭМВ в среде v_r (снег, фирн, лед) от плотности среды ρ_r и доли содержания воды $P_w = 0...0.1$ для $f = 2$ ГГц (а) и $f = 8$ ГГц (б) при $t_r = 0$ °C

Fig. 3. Two-dimensional distribution of the EMW propagation velocity in the medium v_r (snow, firm, ice) on the density of the medium ρ_r and the proportion of water content $P_w = 0...0.1$ for $f = 2$ ГГц (а) and $f = 8$ ГГц (б) at $t_r = 0$ °C

Задержка сигнала до границы раздела сред "снежный покров – ледяной покров" определяется выражением

$$\tau_{si} = \tau_{as} + \tau_s.$$

Разрешающая способность по глубине FM-CW радиолокатора при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала, перекрывающего С...S ($\lambda = 3.75 \dots 15$ см) диапазоны, с частотой от 2 до 8 ГГц ($B = 6$ ГГц) составляет около 4 см [13], что является хорошим показателем при определении возможности безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку со снежно-ледяным покровом.

Последовательное увеличение угла зондирования, начиная с $\theta = 40^\circ$, приведет к последовательному уменьшению (пропаданию) каждого последующего пика эхосигнала с задержкой, определяемой частотой биения (разностью принятого и излученного сигналов) от последующей границы раздела слоев при соответствующих θ (рис. 4), поскольку плотность снежно-ледяного покрова возрастает по мере увеличения глубины, находясь в пределах от $\rho_r = 10$ кг/м³ – для свежеснежавшего снега до $\rho_r = 917$ кг/м³ – для сухого льда без воздушных включений.

Другими словами, прямое решение задачи можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= \{\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rk}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rk}\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{R_{vmin1}, R_{vmin2}, \dots, R_{vmink}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rk}\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{\theta_{B1,2}, \theta_{B2,3}, \dots, \theta_{Bi+1,k}, \tau_{1,2}, \tau_{2,3}, \dots, \tau_{i+1,k}\}. \end{aligned}$$

По заданным комплексным относительным диэлектрическим проницаемостям слоев снежно-ледяного покрова ε_{rk} и их толщинам h_{rk} получают минимальные коэффициенты отражения Френеля R_{vmink} и временные задержки для каждого слоя τ_{rk} . Это исходные данные для определения углов Брюстера $\theta_{Bi+1,k}$ и временных задержек $\tau_{i+1,k}$ для каждой границы раздела слоев снежно-ледяного покрова.

Обратная задача восстановления электрофизических и геометрических параметров снежно-ледяного покрова (реконструкция параметров слоев). Сущность решения обратной

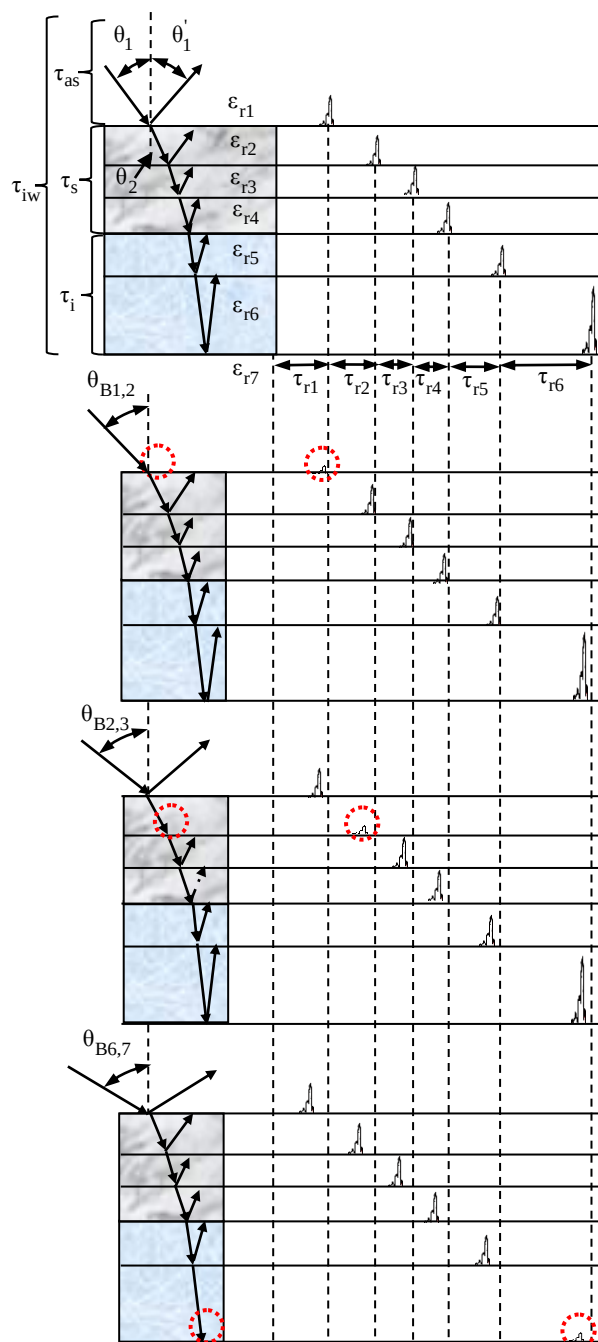


Рис. 4. Углы Брюстера для i -й границы раздела слоев снежно-ледяного покрова

Fig. 4. Brewster angles for the i -is boundary of the snow-ice cover layers

задачи по оценке диэлектрических проницаемостей отдельных слоев снежно-ледяного покрова на основе определения углов Брюстера заключается в следующем. Пусть объектом зондирования подстилающей поверхности является снежно-ледяной покров из k слоев, облучаемый ЛЧМ-сигналом с вертикальной поляризацией под углом в интервале от 40 до 90° .

На рис. 2 и 4 видно отсутствие отраженных сигналов (минимальное их значение) от границ раздела слоев, для сред с комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями:
 $\varepsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, $\varepsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$,
 $\varepsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, $\varepsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$,
 $\varepsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, $\varepsilon_{r7} = 74 - j$, соответствующими углам Брюстера $\theta_{Bi,i+1}$: $\theta_{B1,2} = 49^\circ$,
 $\theta_{B2,3} = 53^\circ$, $\theta_{B3,4} = 57^\circ$, $\theta_{B4,5} = 59^\circ$, $\theta_{B5,6} = 60^\circ$,
 $\theta_{B6,7} = 83^\circ$, в зависимости от угла зондирования в пределах $\theta = 40 \dots 90^\circ$.

По минимальному измеренному коэффициенту отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для $i, i+1$ -границы раздела слоев снежно-ледяного покрова последовательно определяются углы Брюстера $\theta_{Bi,i+1}$, что позволяет найти диэлектрическую проницаемость каждого последующего нижележащего слоя из (4):

$$\varepsilon_{ri+1} = \left(\operatorname{tg} \theta_{B1,i+1} \right)^2. \quad (9)$$

Другими словами, по измеренным минимальным коэффициентам отражения Френеля $R_{vmin i+1,k}$ и временным задержкам $\tau_{i+1,k}$ до границы раздела слоев снежно-ледяного покрова определяют углы Брюстера $\theta_{Bi+1,k}$ и время задержки τ_{rk} электромагнитной волны для каждого слоя. Выходными параметрами являются значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости ε_{rk} и толщины каждого слоя h_{rk} . Кратко это можно представить в виде

$$B = \left\{ R_{vmin1,2}, R_{vmin2,3}, \dots \right. \\ \left. \dots, R_{vmin i+1,k}, \tau_{1,2}, \tau_{2,3}, \dots, \tau_{i+1,k} \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \theta_{B1,2}, \theta_{B2,3}, \dots, \theta_{Bi+1,k}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rk} \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rk}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rk} \right\}.$$

Методическая погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев по углам Брюстера $\theta_{Bi,i+1}$ (см. рис. 2 и 4) при заданных расчетных значениях ε_{ri+1} , найденных по (1)

(например, полученные $\theta_{B1,2} = 49^\circ$, $\theta_{B2,3} = 53^\circ$, $\theta_{B3,4} = 57^\circ$, $\theta_{B4,5} = 59^\circ$, $\theta_{B5,6} = 60^\circ$ при отсутствии влаги) и определенных согласно (9), т. е. их оценка без учета воздействия шума, составляет не более 3 %, что подтверждает правомерность использования (9).

Для оценки погрешностей измерения диэлектрической проницаемости слоев [11], соответствующих реальной практической ситуации, к значениям углов Брюстера $\theta_{Bi,i+1}$ и времени задержки в каждом слое τ_{ri} добавили аддитивный гауссовский шум:

$$\begin{cases} \theta_{Bi,i+1 \text{эксп}} = \theta_{Bi,i+1} + n(f_\xi); \\ \tau_{ri \text{эксп}} = \tau_{ri} + n(f_\xi), \end{cases}$$

где $n(f_\xi)$ – шум, воздействующий на ξ -е измерение, обусловленный как погрешностью комплекса измерения и другими экспериментальными погрешностями при проведении эксперимента, так и достоверностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации.

С учетом этого (7) и (9) примут вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{ri+1 \text{эксп}} = \left\{ \operatorname{tg} \left[\theta_{B1,i+1} + n(f_\xi) \right] \right\}^2; \\ h_{ri \text{эксп}} = \frac{\tau_{ri} v_{ri}}{2} + n(f_\xi). \end{cases}$$

На рис. 5 представлена зависимость измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ri+1 \text{эксп}}$ k слоев (рис. 5, а) и погрешности их оценки (рис. 5, б) при возрастании значений СКО уровня шума от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого, где 1 – $\varepsilon_{r2 \text{эксп}}$, 2 – $\varepsilon_{r3 \text{эксп}}$, 3 – $\varepsilon_{r4 \text{эксп}}$, 4 – $\varepsilon_{r5 \text{эксп}}$, 5 – $\varepsilon_{r6 \text{эксп}}$.

На рис. 6 представлена зависимость измеренных значений глубин $h_{ri \text{эксп}}$ k слоев (рис. 6, а) и погрешности их оценки (рис. 6, б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1, где 1 – $h_{r1 \text{эксп}}$, 2 – $h_{r2 \text{эксп}}$, 3 – $h_{r3 \text{эксп}}$, 4 – $h_{r4 \text{эксп}}$, 5 – $h_{r5 \text{эксп}}$.

Анализ зависимостей на рис. 5 и 6 показывает, что погрешности оценок измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ri+1 \text{эксп}}$ и глубин $h_{ri \text{эксп}}$ k слоев при возрастании

СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышают 10 %, что свидетельствует о правомерности использования данного метода.

Полученные значения диэлектрических проницаемостей слоев ϵ_{i+1} ($i+1$ -го слоя) отождествляются с образцовыми значениями диэлектрических проницаемостей слоев $\epsilon_{v\Delta}$, и оценивается состояние снежно-ледяного покрова по условию $\epsilon_{i+1} = \epsilon_{v\Delta}$: снежный покров, фирн, ледяной покров либо вода.

При отрицательных температурах $t = -1...-40$ °С действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев ϵ_r (ϵ_s – снега (snow), ϵ_f – фирна (firm), ϵ_i – льда (ice)) с плотностью слоев $\rho_r = 100...917$ кг/м³ ($\rho_s = 100...500$ кг/м³; $\rho_f = 500...700$ кг/м³; $\rho_i = 700...917$ кг/м³) не зависит от $f = 1...10$ ГГц, а только от температуры t в небольших пределах. Действительная часть образцовых значений относительных диэлектрических проницаемостей влажных сред $\epsilon'_{v\Delta}$ (для общей формулы трехкомпонентной среды): $\epsilon'_{vs\Delta}$ – снега (snow); $\epsilon'_{vf\Delta}$ – фирна (firm); $\epsilon'_{vi\Delta}$ – льда (ice); $\epsilon'_{pw\Delta}$ – чистой воды; $\epsilon'_{sw\Delta}$ – морской воды.

Например, при $t = -1...-40$ °С для снега как двухкомпонентной среды воздуха и льда действительная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{vs\Delta}$ находится между воздухом $\epsilon'_{va\Delta} = 1$ и льдом $\epsilon'_{vi\Delta} = 3.15$ (для сухого плотного льда без воздушных включений с $\rho_i = 917$ кг/м³ – $\epsilon'_{vi\Delta} = 3.20 \pm 0.02$), для фирна (плотно слежавшегося, зернистого и частично перекристаллизованного, обычно многолетнего снега, т. е. промежуточной стадии между снегом и глетчерным льдом) относительная диэлектрическая проницаемость приближается к значениям для льда. Для воды, находящейся под снежно-ледяным покровом при $t = 0$ °С, на частотах $f = 2...8$ ГГц наблюдается плавное снижение действительной части диэлектрической проницаемости для талой воды $\epsilon'_{pw\Delta} = 83.84...51.03$, для морской воды соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг – $\epsilon'_{sw\Delta} = 74.97...48.42$ [6].

Значения действительной части диэлектрической проницаемости среды ϵ_r рассчитаны по формуле Г. Луэнга [6, 16–19] для таких сред с включениями воздуха и льда сферической формы

$$\epsilon_r = \left[v_i \left(\sqrt[3]{\epsilon_i} - 1 \right) + 1 \right]^3, \quad (10)$$

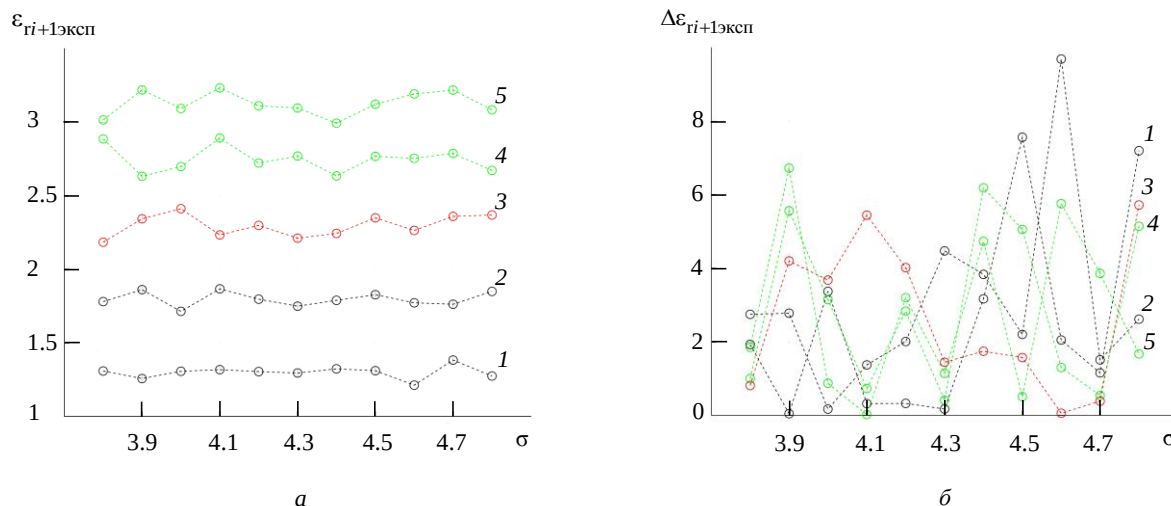


Рис. 5. Графики зависимостей измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{i+1,exp}$ k слоев (а) и погрешности их оценки $\Delta\epsilon_{i+1,exp}$ (б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 5. Dependence of the measured values relative permittivity $\epsilon_{i+1,exp}$ k of layers (a) and errors in their estimation $\Delta\epsilon_{i+1,exp}$ (b) when the values of the noise level MSD increase σ from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

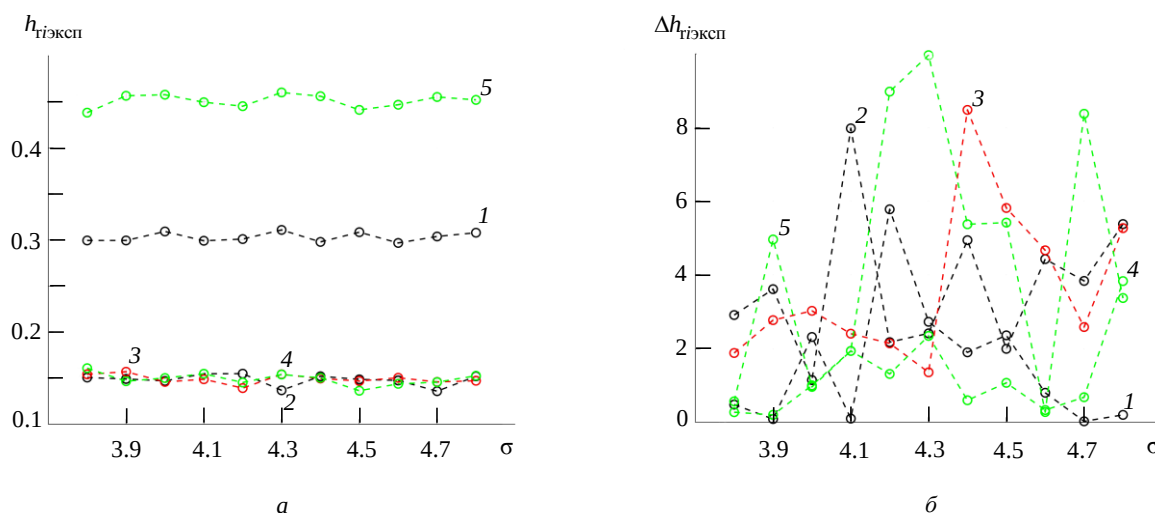


Рис. 6. Графики зависимостей измеренных значений глубин $h_{T\kappa\text{эксп}}$ k слоев (a) и погрешности их оценки $\Delta h_{T\kappa\text{эксп}}$ (b) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 6. Dependence of the measured values of the depths $h_{T\kappa\text{эксп}}$ k of layers (a) and errors in their estimation $\Delta h_{T\kappa\text{эксп}}$ (b) when the values of the noise level MSD increase σ from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

где $v_i = \rho_r / \rho_i$ – объемное содержание льда; ρ_r – плотность сухой среды (сухого (**dry**) снега ρ_{ds} , фирна ρ_{df} , льда ρ_{di}); $\rho_i = 917 \text{ кг/м}^3$ – плотность сухого льда без воздушных включений; ϵ'_i – действительная часть диэлектрической проницаемости льда.

При температуре $t = 0^\circ \text{C}$ весомый вклад в диэлектрическую проницаемость будет вносить

влажность (доля содержания воды в слое) для двухкомпонентной смеси лед–вода с порами, заполненными водой:

$$\epsilon'_{VT} = \left[\sqrt[3]{\epsilon'_r} + P_w \left(\sqrt[3]{\epsilon'_w} - \sqrt[3]{\epsilon'_i} \right) \right]^3, \quad (11)$$

где P_w – общая доля содержания воды; ϵ'_i и ϵ'_w – относительные диэлектрические проницаемости

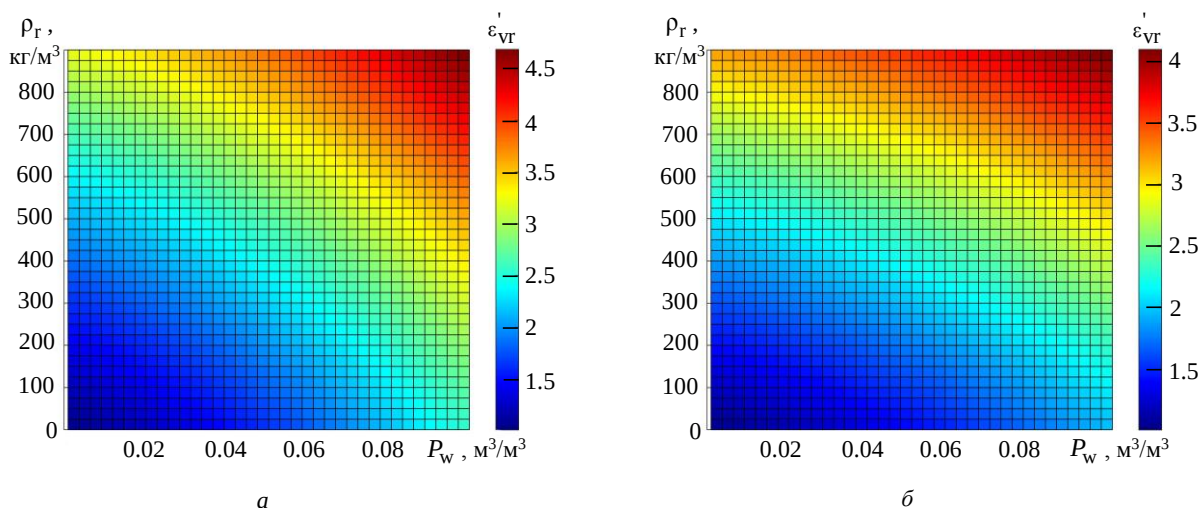


Рис. 7. Двумерное распределение действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ'_{VT} (снег, фирн, лед) от плотности среды ρ_r (10) и доли содержания воды (11) $P_w = 0 \dots 0.1$ для

$f = 2 \text{ ГГц}$ (a) и $f = 8 \text{ ГГц}$ (b) при $t_r = 0^\circ \text{C}$

Fig. 7. Two-dimensional distribution of the real part of the complex relative permittivity of the medium ϵ'_{VT} (snow, firm, ice) on the density of the medium ρ_r (10) and the proportion of water content (11) $P_w = 0 \dots 0.1$ for

$f = 2 \text{ ГГц}$ (a) and $f = 8 \text{ ГГц}$ (b) at $t_r = 0^\circ \text{C}$

льда и воды соответственно. Общая формула для трехкомпонентной среды [6, 16–19], состоящей из льда с включениями воды и воздуха, учитывающая частные случаи (10) и (11):

$$\varepsilon'_{\text{VT}} = \left[\sqrt[3]{\varepsilon'_T} (1 - P_{\text{wa}}) + P_{\text{W}} \left(\sqrt[3]{\varepsilon'_W} + P_{\text{wa}} - P_{\text{W}} \right) \right]^3,$$

где P_{wa} – общая доля содержания воды и воздуха.

На рис. 7 показано изменение действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ε'_{VT} (правая шкала) в зависимости от доли содержания воды $P_{\text{W}} = 0...0.1$ (нижняя шкала) и плотности среды (снег, фирн, лед) ρ_T (левая шкала) при $t_T = 0^\circ\text{C}$ для частоты $f = 2$ ГГц (рис. 7, а) и $f = 8$ ГГц (рис. 7, б).

Таким образом, по диэлектрической проницаемости, полученной косвенным путем в результате наклонного зондирования подстилающей поверхности ЭМВ с вертикальной поляризацией, возможно восстановление параметров слоев снежно-ледяного покрова, в том числе плотности ρ_T и доли содержания воды P_{W} .

Повысить точность определения угла Брюстера для границ раздела слоев снежно-ледяного покрова, а следовательно, и вероятность правильной идентификации можно за счет использования на борту воздушного судна вертолетного типа гиростабилизированной платформы².

Заключение. Таким образом, получены интервалы значений угла Брюстера при наклонном зондировании радиоволной с вертикальной поляризацией в интервале от 40 до 90° , при котором значение коэффициента отражения Френеля от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова будет минимальным. Так для сухого снега интервал значений угла Брюстера соответствует $47...55^\circ$, сухого фирна – $55...58^\circ$ и сухого льда – $58...61^\circ$.

Вероятность идентификации составляющих элементов структуры снежно-ледяного покрова возрастает, тем самым повышая уровень безопасности посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку со снежно-ледяным покровом, за счет увеличения разрешающей способности по глубине, которая при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с частотой от 2 до 8 ГГц составляет около 4 см.

Погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев (см. рис. 2 и 4) по углам Брюстера $\theta_{\text{Bi},i+1}$ при заданных расчетных значениях

$\varepsilon_{\text{Ti}+1}$ согласно формуле $\varepsilon_{\text{Ti}+1} = (\text{tg } \theta_{\text{Bi},i+1})^2$ составляет не более 3% .

Погрешность оценки измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{Ti}+1\text{эксп}}$ и глубин $h_{\text{Tiэксп}}$ k слоев при возрастании СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышает 10% , что подтверждает правомерность использования данного метода.

Авторский вклад

Машков Виктор Георгиевич – разработка метода, проведение и анализ результатов численного моделирования параметров многослойной среды.

Малышев Владимир Александрович – расчет и анализ характеристик снежно-ледяного покрова.

Федюнин Павел Александрович – обработка и анализ полученных результатов.

Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Viktor G. Mashkov, development a method, numerical and analysis modeling parameters a multi-layer medium.

Vladimir A. Malyshev, calculation and analysis of snow-ice cover characteristics.

Pavel A. Fedyunin, processing and analysis of the results obtained.

All authors participated in the discussion of the results and preparation of the article.

² Гиростабилизированная платформа – устройство для пространственной стабилизации каких-либо объектов или приборов, а также для определения углов поворота основания, на котором оно установлено. Служит для устране-

ния влияния внешних воздействий, приводящих к выходу приборов, расположенных на платформе, из заданного положения. URL: <https://www.npo-karat.ru/page/16-56/> (дата обращения 27.10.2020)

Список литературы

1. Пат. RU 2707275 G01S 13/94. Способ выбора площадки для посадки воздушного судна вертолетного типа / В. Г. Машков, В. А. Малышев. Оpubл. 26.11.2019.
2. Пат. RU 2737761 G01S 13/94. Способ оценки возможности посадки воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом / В. Г. Машков, В. А. Малышев, Р. А. Прохорский. Оpubл. 02.12.2020.
3. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 112 с.
4. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов / под ред. В. Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
5. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную заснеженную площадку // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 4 (27). С. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037
6. Малышев В. А., Машков В. Г. Скорость распространения электромагнитной волны в снежно-ледяной подстилающей поверхности // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 3 (5). С. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05
7. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 3 (30). С. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017
8. Пат. RU 2262718 G01S13/95 (2006.01). Способ измерения толщины снежного покрова / Е. Л. Шошин, А. М. Суханюк, И. И. Плюснин. Оpubл. 20.10.2005. Бюл. № 29.
9. О возможности определения диэлектрической проницаемости верхних слоев подстилающих сред по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ-диапазоне / А. С. Шостак, В. В. Загоскин, С. П. Лукьянов, А. С. Карауш // Журн. радиоэлектроники. 1999. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/mac/nov99/4/abstract.html> (дата обращения 07.12.2017)
10. Пат. RU 2613810 G01R 27/00 (2006.01). Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ-диапазоне / Г. Г. Валеев. Оpubл. 21.03.2017. Бюл. № 9.
11. Пат. RU 2623668 G01R G01N (2006.01). Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан / А. С. Запевалов. Оpubл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
12. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове / В. М. Котляков, Ю. Я. Мачерет, А. В. Сосновский, А. Ф. Глазовский // Лед и снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56
13. Sudarsan Krishnan B. E. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness / Electronics and communication engineering. University of Madras, 2000. 84 p.
14. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 288 с. doi: 10.18127/B9785931081915
15. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 392 с.
16. Мачерет Ю. Я. Оценка содержания воды в ледниках по гиперболическим отражениям // Материалы гляциологических исследований. 2000. № 89. С. 3–10.
17. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
18. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data // Polar Research. 2000. Vol. 19, iss. 2. P. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546
19. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников / РАН, Ин-т географии. М.: Науч. мир, 2006. 389 с.

Информация об авторах

Машков Виктор Георгиевич – к. т. н. (2008) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), доцент (2017) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж), докторант кафедры "Эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов)" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 240 научных публикаций. Сфера научных интересов – подповерхностная радиолокация и радиовидение.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: mvgblaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

Малышев Владимир Александрович – д. т. н. (2008) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), профессор (2017) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж), профессор кафедры "Общевое военных дисциплин" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 280 научных публикаций. Сфера научных интересов – интеллектуальные информационно-измерительные системы.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия
E-mail: vimalyshev@list.ru

Федюнин Павел Александрович – д. т. н. (2007) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), профессор (2010) Военного авиационного инженерного университета (Воронеж), почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2015), начальник кафедры "Управления воинскими частями связи и радиотехнического обеспечения авиации" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор более 300 научных публикаций. Сфера научных интересов – измерения параметров специальных сред и материалов в диапазоне СВЧ, прикладная техническая электродинамика.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия
E-mail: fpa1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6663-4362>

References

1. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Sposob vibora ploshadki dly posadki vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa* [Method for selecting a landing site for a helicopter-type aircraft]. Patent RF, no. 2707275 G01S 13/94. Publ. 26.11.2019. (In Russ.)
2. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. *Sposob ocenki vozmozhnosti posadki vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa na vodoem so snezhno-ledyanyim pokrovom* [Method for assessing the possibility of landing a helicopter-type aircraft on a body of water with snow and ice cover] Patent RF, no. 2737761 G01S 13/94. Publ. 02.12.2020. (In Russ.)
3. Finkel'shtejn M. I., Lazarev E. I., Chizhov A. N. *Radiolokacionnye aëroledomernye s'emki rek, ozer, vodohranilishch*. L., Gidrometeoizdat, 1984, 112 p. (In Russ.)
4. Kanarejkin D. B., Pavlov N. F., Potekhin V. A. *Polyarizatsiya radiolokacionnykh signalov*. Ed. V. E. Dulevicha. M., Sov. radio, 1966, 440 p. (In Russ.)
5. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model helicopter-type aircraft landing control on an unprepared snow-covered area. Modeling, optimization and information technology. 2019, no. 4 (27), pp. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037 (In Russ.)
6. Malyshev V. A., Mashkov V. G. The speed electromagnetic wave propagation in the snow-ice underlying surface. Radioengineering. 2020, vol. 84, no. 3 (5), pp. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05 (In Russ.)
7. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model for controlling the landing of a helicopter-type aircraft on a reservoir with snow and ice cover. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology]. 2020, no. 3 (30), pp. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017 (In Russ.)
8. Shoshin E. L., Suchanek A. M., Plyusnin I. I. *Sposob izmereniya tolshchiny snezhnogo pokrova* [The method of measuring the snow cover thickness]. Patent RF, no. 2262718. Publ. 20.10.2005. (In Russ.)
9. Shostak A. S., Zagoskin V. V., Lukyanov S. P., Karaush A. S. *O vozmozhnosti opredeleniya dielektricheskoy pronitsaemosti verkhnykh sloev podstilayushchikh sred po izmerennym koeffitsientam otrazheniya pri naklonnom zondirovanii ploskimi volnami vertikal'noj i gorizonta'noj polarizatsii v SVCH diapazone* // *Zhurnal radioelektroniki* [Radio electronics magazine]. 1999, no. 11. Available at: <http://jre.cplire.ru/mac/nov99/4/abstract.html> (date accessed 07.12.2017) (In Russ.)
10. Valeev G. G. *Sposob izmereniya otnositel'noj kompleksnoy dielektricheskoy pronitsaemosti materiala s po-teryami v SVCH diapazone* [Method for measuring the relative complex permittivity of a material with losses in the microwave range]. Patent RF, no. 2613810. Publ. 21.03.2017. (In Russ.)
11. Zapevalov A. S. *Sposob distantsionnogo opredeleniya otnositel'noj dielektricheskoy pronitsaemosti sredy pod granicey atmosfera-okean* [Method for remote determination of the relative permittivity the medium under the atmosphere-ocean boundary]. Patent RF, no. 2623668. Publ. 28.06.2017. (In Russ.)

12. Kotlyakov V. M., Macheret Yu. Ya., Sosnovsky A. V., Glazovsky A. F. Speed of radio waves propagation in dry and wet snow cover. *Led i sneg* [Ice and Snow]. 2017, no. 57, iss. 1, pp. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56 (In Russ.)

13. Sudarsan Krishnan B. E. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. Electronics and communication engineering. University of Madras, 2000, 84 p.

14. Kupryashkin I. F., Likhachev, V. P., Ryazantsev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-sized multifunctional radars with continuous frequency-modulated radiation]. M., *Radiotekhnika*, 2020, 288 p. doi: 10.18127/B9785931081915 (In Russ.)

15. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverhnostnogo zondirovaniya. Monitoring i diagnostika sred*

i ob'ektov [Subsurface sensing radars. Monitoring and diagnostics among objects]. M., *Radiotekhnika*, 2013, 392 p. (In Russ.)

16. Macheret Yu. Ya. Estimation of water content in glaciers by hyperbolic reflections. *Materialy glyaciologicheskikh issledovaniy* [Materials of glaciological research]. 2000, no. 89, pp. 3–10. (In Russ.)

17. Glazovsky A. F., Macheret Y. Ya. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distancionnykh issledovaniy*. [Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies]. M., *GEOS*, 2014, 528 p. (In Russ.)

18. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data. *Polar Research*. 2000, vol. 19, iss. 2, pp. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546

19. Macheret Yu. Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. [Radioecho sounding of glaciers]. RAN, Institute of geography. M., Scientific World, 2006, 389 p. (In Russ.)

Information about the authors

Viktor G. Mashkov, Cand. Sci. (Eng.) (2008) Tambov higher military aviation engineering school of Radioelectronics (military Institute), docent (2017) Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh), Doctoral Student the Department "Operation radio equipment (flight support)" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author 230 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: mvglaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

Vladimir A. Malyshev, Dr. Sci. (Eng.) (2008) Tambov higher military aviation engineering school of radio electronics (military Institute), Professor (2017) Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh), Professor the Department "Common military discipline" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author 270 scientific publications. Area of expertise: intelligent information and measurement systems.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: vmalyshev@list.ru

Pavel A. Fedyunin, Dr. Sci. (Eng.) (2007) Tambov higher military aviation engineering school of radio electronics (military Institute), Professor (2010) Military aviation engineering University (Voronezh), Honorary worker of higher professional education of the Russian Federation (2015), Head the Department "Management military units communication and radio engineering support aviation" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: measurement of parameters of special media and materials in the microwave range, applied technical electrodynamics.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: fpa1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6663-4362>

Quantum, Solid-state, Plasma and Vacuum Electronics

UDC539.21; 541.182; 548.5; 620.18; 681.586

Original article

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-48-58>

SEM Investigation of ZnO and CdO–ZnO Layers Grown by Sol-Gel Technology and a Multifractal Analysis of their Surface Depending on Synthesis Conditions

Wojciech Sadowski¹, Pavel P. Moskvina^{2✉}, Vyacheslav B. Kryzhanivskyy²,
Galyna V. Skyba², Oleksandr I. Prylypko²

¹Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland

²Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

✉moskvina Pavel56@gmail.com

Abstract

Introduction. Super-thin films of zinc oxide regarded as transparent electrodes can be integrated in effective semiconductor heterostructures for use in modern infrared photo electronics and solar power installations. The most important parameter of zinc oxide thin layers is their surface nanorelief, which can be effectively studied using SEM spectroscopy. SEM images allow for a quantitative description of the surface depending on the synthesis conditions using the method of multifractal analysis. Such an approach reveals quantitative relationships between the fractal parameters of the surface topography of the layers in these systems and the temperature regimes used for their final annealing in conventional sol-gel technology.

Aim. To reveal quantitative relationships between the fractal parameters of the surface topography of layers in the Zn–O & Zn–Cd–O systems and the temperature conditions of their final annealing. The MFA method was used for a quantitative description of the surface state depending on the synthesis conditions.

Materials and methods. Super-thin films in the ZnO and ZnO–CdO systems were synthesized using a modified sol-gel technology. The temperature-concentration ranges of the parameters of the modified technological process, which allows high-quality layers of the material to be reproducibly obtained on a glass substrate, were determined. The surface morphology was investigated by SEM spectroscopy depending on the temperature of the final annealing of the layers. SEM images of the surface served as a basis for multifractal analysis (MFA) of the surface area and volume of nanoforms, which are formed on the surface of the obtained layers thus determining their surface relief.

Results. Renyi's numbers and the parameters of fractal ordering in MFA were chosen as fractal parameters for describing the nano-geometry of the layer surface. MFA was applied to the description of both the surface areas and volumes of nanoforms. Quantitative correlations between Renyi's numbers, as well as the parameters of fractal ordering for the areas and volumes of surface nanoforms, and the temperature of the final annealing were found.

Conclusion. The numerical values of Renyi's numbers for the surface and volume characteristics of the surface of layers were used to assess the effect of the fractality of the surface on the molar surface energy of the film. Consideration of the fractal geometry of nanoforms with their characteristic sizes smaller than $5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ shows the possibility of both an increase in the surface energy of the resulting film and its decrease when changing the characteristic sizes of nanoforms. The latter effect is due to the formation of a highly porous surface at the nano level.

Keywords: surface structure, crystal morphology, second electron microscopy, oxides, zinc compounds

For citation: Sadowski W., Moskvina P. P., Kryzhanivskyy V. B., Skyba G. V., Prylypko O. I. SEM Investigation of ZnO and CdO–ZnO Layers Grown by Sol-Gel Technology and a Multifractal Analysis of their Surface Depending on Synthesis Conditions. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 48–58. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-48-58

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 15.12.2020; accepted 18.01.2021; published online 25.02.2021



Introduction. The development of a reproducible technology for the formation of transparent electrodes is part of physical, chemical and technological problem of obtaining the effective semiconductor hetero structure for modern infrared photo electronics and solar power. Currently, a superthin layer of zinc oxide is viewed as a transparent electrode in such devices. Zinc oxide is a wide-gap semiconductor ($E_g = 3.32 \text{ eV}$), which allows it to be a transparent material in the visible and infrared range of electromagnetic wavelengths. Despite the significant band gap, which is more typical for dielectrics, this material has a relatively low electrical resistivity, which depending on the defective state of the film, is in the range of $10^{-2} \dots 10^{-4} \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$. The latter means that the material can be used as a conductive optically transparent electrode. An equally important advantage of the material is the rather high chemical stability of the compound with its low toxicity.

Super thin films of zinc oxide are usually synthesized using traditional sol-gel technology. The main stages of this process are well known and their conditions are analyzed in sufficient detail [1–3]. One of the important advantages of the sol-gel process of material synthesis is relative independence of the stages of its implementation. This situation opens up the possibility of its phased modernization. The most important contributes to the sol-gel process, which are subject to detailed study and improvement, were the stage of formation of the initial gel and the stage of searching for optimal temperatures during their annealing, when the final properties of the layers are formed. Naturally, the emphasis will be put on the analysis of the influence of the conditions for carrying out these stages of the sol-gel process on the final properties of the films.

The most important parameter of the thin layer is the morphology of its surface, which is determined by its surface relief. It can be argued that the surface relief of the layers is a mirror in which all the selected conditions of the synthesis of the layer are reflected. Therefore, the study of the surface topography of layers at the nanoscale, as well as the implementation of its quantitative description, is an important task at the stage of development of controlled technologies for obtaining material for its further use in electronic devices.

One of the most effective and visual methods for studying the surface of semiconductor layers at the nanoscale is SEM spectroscopy. The high resolution

for surface elements in the resulting images opens the possibility of the effective use of such data for their further mathematical processing in order to obtain quantitative characteristics of the surface of the layers. As such a mathematical method for analyzing the geometric parameters of complex surface nanoforms the multifractal analysis (MFA) has been used. It is fractal analysis that makes it possible to quantitatively characterize the parameters of nanoforms that form a surface relief and which are very difficult to describe by the classical geometric figures.

At the same time, the experience of using fractal analysis to quantitatively describe the surface state shows that using only the Hausdorff's dimension of the corresponding surface as an output parameter significantly limits the informative volume of such quantitative data [3, 5–11]. This is due to the relatively weak dependence of the power exponent (Hausdorff's dimension) in the corresponding power series on the shape of the surface under consideration. This drawback of fractal analysis is eliminated during the transition to MFA, when the entire spectrum of Renyi's numbers is used for the quantitative description of complex geometric shapes, and not just its particular case of the Hausdorff's dimension.

This situation made it possible to formulate the following approach to quantitative studies of the relationship between surface relief parameters and the conditions of the final annealing of the layers of the Zn–O and Zn–Cd–O systems in the process of sol-gel synthesis. Thus, the purpose of this work is to search for quantitative relationships between the fractal parameters of the surface topography of the layers of these systems and the temperature conditions of the final annealing of the layers. For a quantitative description of the surface state, depending on the synthesis conditions, the MFA method was used. The surface area and the volume of nanoforms were chosen as geometric parameters for the fractal description of the surface. Naturally, this kind of geometric parameters were found by numerically processing the corresponding SEM images. The practical implementation of the procedures described above made it possible to obtain quantitative relationships between the parameters of the MF spectra for the volume and surface area of nanoforms that are formed on the surface of layers synthesized by the sol-gel method, i. e. to achieve the goals set before work.

It is necessary to point out that previously we successfully applied a similar approach in [6–10] to search

for the relationships between the parameters of MF spectra from the surface of the layers and the conditions for the synthesis of superthin $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ solid solution films by vacuum technologies.

The significance of the obtained quantitative data on fractal characteristics of the surface of the layers for further theoretical studies is shown by their use for analyzing the dependence of the molar surface energy on the parameters of the nanorelief of the surface. The performed analysis shows that the data on the fractal parameters of the surface make it possible to estimate the contribution of surface energy to the overall energy balance of the nanosystem.

Methods.

1. Peculiarities of the synthesis of layers by the sol-gel method. The process of obtaining films, which was implemented as a whole, met the typical procedures for the deposition of semiconductor layers by this technology [1, 2, 4, 5]. The following chemical substances were used to form the sols: the precursor was tetraethyloxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, and the solvent was a solution of ethyl alcohol in water. The chemical reaction was catalyzed by chloride acid. Zinc nitrate – $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was used to dope the silicate matrix.

The sol preparation process was carried out in accordance to the typical steps for the sol-gel technology. At the first stage, an exchange reaction of tetraethyloxysilane with ethyl alcohol was carried out for 30 min at room temperature. The hydrolysis of the obtained esters was carried out by introducing into the resulting solution of distilled water in a ratio of 4: 1 and chloride acid (20...50 μl) as a catalyst. The process of chemical interaction was accompanied by vigorous stirring of the solution for 1 hour. Orthosilicate acid, which was synthesized and polycondensed during chemical processes, formed the main chain of the polymer sol molecule. Thus, it was the obtained solution of sol of orthosilicate acid with film-forming properties, which was the purpose of this stage of synthesis [1, 2, 4, 5]. At the same stage, the calculated the amount of dopant $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – salt of zinc nitrate – was introduced into the solution. This made it possible to form a transparent silica sol solution of a given composition. The largest number of experiments on the synthesis of layers was carried out with sols of the following composition 50 $\text{ZnO} \cdot 50 \text{SiO}_2$ wt. %.

Therefore, the obtaining sol solution was deposited on substrates that were previously prepared by chemical etching of their surface in acid. Glass was used as a substrate in the overwhelming set of experiments. This made it possible to minimize the influence of the crystallographic and mechanical properties of the substrate on the formation of final properties of the synthesized layers.

The necessary properties of the gel layer on the substrate surface were formed by centrifugation at the next stage of the process. The parameters that controlled this stage of the process were the time of sol deposition on the substrate, the number of revolutions, and the location of the substrate on the substrate holder during centrifugation. The ranges of variations of these parameters were found during preliminary evaluation experiments. The main quality criterion for conducting this stage of the process was the requirement to obtain continuous films of a given thickness. The found ranges of variation of the indicated parameters of this process were as follows: the prepared sol was aged for 2 hours, 50 μl of sol was applied to a horizontally placed substrate. Centrifugation was carried out for 2 min at 3600 rpm.

The final stage of the sol-gel process was the annealing of the formed films. At this stage, the solvent was removed both from the pores on the surface and from the volume of the film, the syneresis of the sol, chemical reactions of the decomposition of zinc nitrate and orthosilicate acid took place too. The complexity and multi-stage of physic-chemical processes occurring at this method of synthesis stimulated carry out the annealing in two stages. This allowed us to significantly improve the morphological quality of the surface of the films. The low-temperature annealing stage corresponded to a temperature of 80...90 °C. The temperature of the final annealing in the experiments was considered as an independent variable and its value varied in the range from 200 till 500 °C. A typical high-temperature annealing step for all samples was carried out for 10 min.

The phase composition of the synthesized layers was controlled by X-ray diffractometry measurements [5]. According to X-ray studies films obtained by the sol-gel method form a crystalline phase of zinc oxide with a wurtzite structure. A strong confirmation of the aforesaid was the clear diffraction peaks in the diffraction patterns, which corresponded to the reflection of X-ray radiation from planes with (100), (002), (101) crystallographic orientation.

2. SEM measurements. To analyze the surface morphology of the samples, a FEI Quanta FEG 250 scanning electron microscope (SEM) operated at 10 kV was used. SEM images were recorded in contact mode using a Si tip with a radius lower than 10 nm.

Typical SEM images of the surface of the synthesized ZnO layers are shown in Fig. 1 for various temperatures of final annealing.

The composition of the initial sol: 50 ZnO·50 SiO₂ wt. %. The top photos show the image acquisition modes and their linear scale.

The obtained SEM images of the film surface were used to calculate the multifractal (MF) spectra of both the surface area and the volumes of nanoforms that were formed during the synthesis of the layers [6–10].

The reliability of the conclusions about the existence of relationships between the parameters of the MF spectra and the synthesis conditions requires an assessment of the accuracy for the final results for the parameters of the MF spectra. Reliability estimates performed in the work showed that the greatest error in the final values of the parameters of the MF spectrum is connected with the contrast of the resulting image, which depends, first of all, on the magnification factors of the obtained image.

To evaluate the effect of this error on the calculated parameters of the MF spectra, we used surface images obtained with different magnifications. The variation range of the increase factors in the SEM method varied from 10⁵ till 2·10⁴. The performed calculations of the parameters of the MF spectra, performed for the same sample, but with a different magnification factor, made it possible to find quantitative values for the most probable error of their finding. Thus the obtained estimates of the error in determining the MF parameters are shown in Fig. 2, 3, where the main results of quantitative image processing are presented.

Experience with MF spectra has shown that the final calculations of MF parameters also differ somewhat for the same sample when varying the position of the photographic sample over the layer surface. Calculations of the parameters of the MF spectra for different regions on the surface of the same sample showed that their numerical values differ from each other by less than 1...3 rel. %. Therefore, according to the estimates made, it can be argued that the main uncertainty in the numerical processing of surface relief data is created by the contrast of the resulting image, which depends pri-

marily on the magnification of the microscope. This allowed for further analysis to use the image acquisition mode with a gain of 10⁵ and to maintain it constant for all photographs taken.

The obtained SEM images of the film surface were used to calculate the MF spectra of both the surface area and the volumes of nanoforms that were formed during the synthesis of the layers.

3. MFA implementation features. To calculate the MF spectra of the surface area and volumes of the relief-forming nanoforms, the procedures described in detail in [6, 7] were used. The method of coarse partitions was realized when the MF spectra parameters were calculated in accordance with the procedure typical for this analysis method [6, 7, 12–15]. In this case, a statistical sum was formed for a cell of a given

size: $Z(q, K) = \sum_{i=1}^K v_i^q$, where K is the index of the

maximum value for the normalized length of the cube edge l_i used at the current step in the method of coarse partitions, q is the increasing number in the MF analysis. Naturally, when calculating the MF spectra of the surface area or volume of the relief-forming layer, either the area of the layer surface element or the volume of the relief-forming part of the surface were chosen as the base measure set.

The related surface area $v_{S,i}$ and related volume $v_{V,i}$ contained in a given box were considered as a measure of this box: $v_{S,i} = S_i / S$; $v_{V,i} = V_i / V$ where S_i and V_i – are the elementary surface area and the volume of contained in the i box correspondingly; S and V – are the total area and the volume correspondingly, which were obtained from spatial video images.

Calculations of generalized statistical sums for the indicated geometric parameters of the surface of the layers synthesized by the sol-gel method show that, depending on the chosen values of "k", they are a collection of points that are grouped along straight lines. This is significant evidence of the presence of fractal symmetry in the system for its selected geometric parameters. The calculation of linear regression parameters between the indicated system parameters was carried out using the least squares method for each of the selected values of the number. The data on linear regression coefficients were used to calculate all the functions necessary for conducting MF analysis [12–15]. All the components of the MF analysis and functions are calculated by numerical methods.

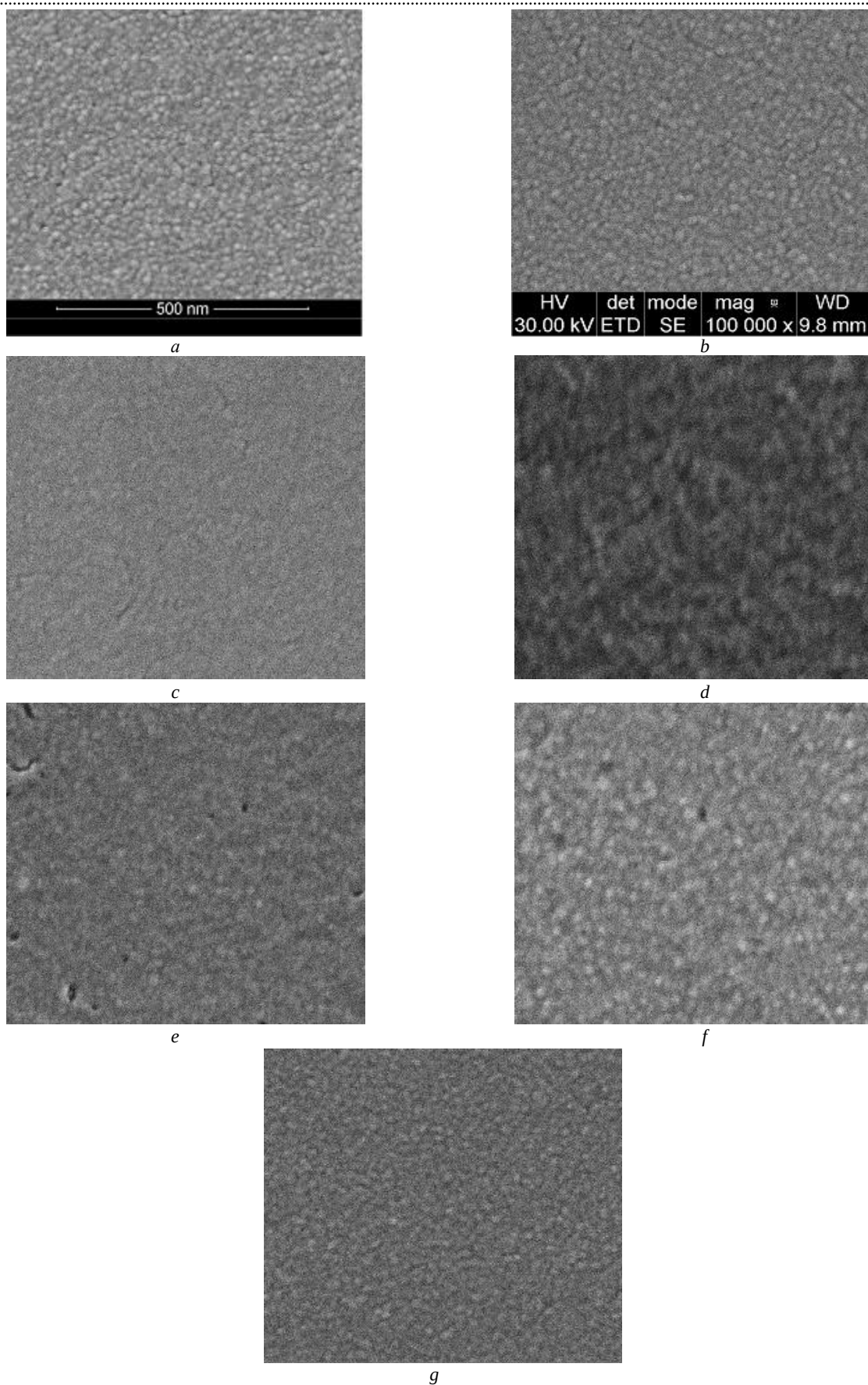


Fig. 1. SEM images of ZnO layers synthesized on glass substrates. Temperature of final anneal are the fol-low: *a* – 200 °C; *b* – 250 °C; *c* – 300 °C; *d* – 350 °C; *e* – 400 °C; *f* – 450 °C; *g* – 500 °C for 10 min

The approach described above made it possible to calculate the MF spectra and parameters for the areas and volumes of surface forms both for the images shown in Fig. 1 and for similar images of the layer surfaces for (CdO–ZnO) solid solutions. As in [6–9], the most informative MF parameters describing the spatial characteristics of the surface structure were selected Renyi's numbers $D_{S,q=0}$, $D_{V,q=0}$ and ordering parameters: $\Delta_{S,q=80} = D_{S,q=1} - D_{S,q=80}$; $\Delta_{V,q=80} = D_{V,q=1} - D_{V,q=80}$ (the degree of fractal symmetry breaking). In the designation of the MF spectra parameters their double indexing is used. This is necessary because according to the subsequent analysis, the MF parameters obtained in the work will be used both for surface areas and for volumes of surface forms formed on the surface of the layers.

Results and discussions. The calculations showed that the characteristic functions of the MFA $\tau(q)$, $f(\alpha)$, $D(q)$ in accordance with [12–15]) for the distribution of the surface area and volumes of nanoforms of the layers obtained by the sol-gel

method correspond to their canonical forms. This means that the sequences of Renyi's numbers $D_S(q)$, $D_V(q)$ are decreasing and the corresponding $f(\alpha)$ functions have a characteristic maximum. It should be noted as in [12–15], that when processing SEM images of the surface of films deposited at different temperatures, no result was obtained to ensure the obtaining of the so-called pseudo-spectrum [9]. This result once again confirms the importance of the stage of the correct formation of the initial data or, which is the same, the generation of the initial measure in the implementation of the MFA [6, 7, 12–15].

The obtained quantitative data on the MF parameters for the distributions of volumes and surface areas of nanoforms allow a comparative quantitative analysis of the influence of the synthesis temperature of the ZnO films on the geometric parameters of surface nanoforms. The set of such relationships between the Renyi's numbers D_{S0} , D_{V0} , ordering parameters Δ_V , Δ_S and the temperature on the sub-

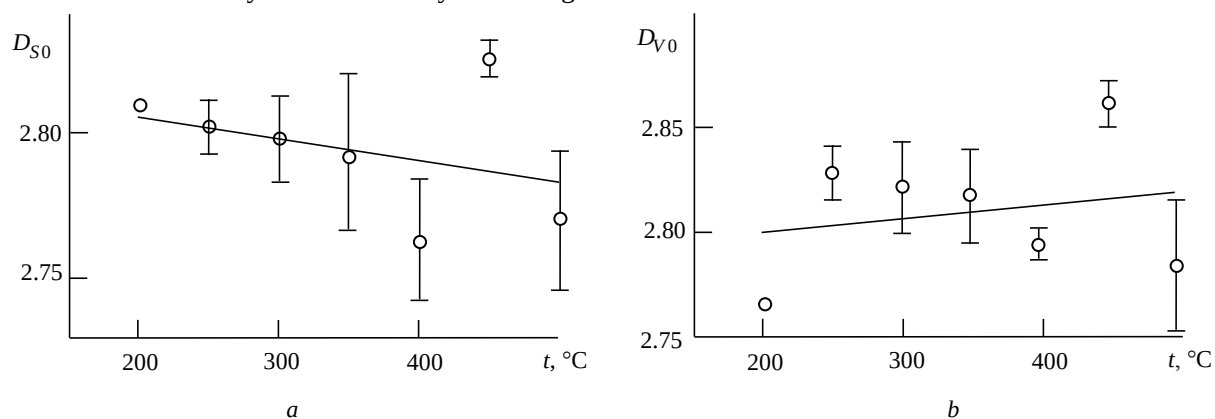


Fig. 2. Dependences of the Renyi's numbers for surface area D_{S0} (a) and volumes of nanoforms D_{V0} (b) on the temperature of the synthesis of ZnO layers by the sol-gel method

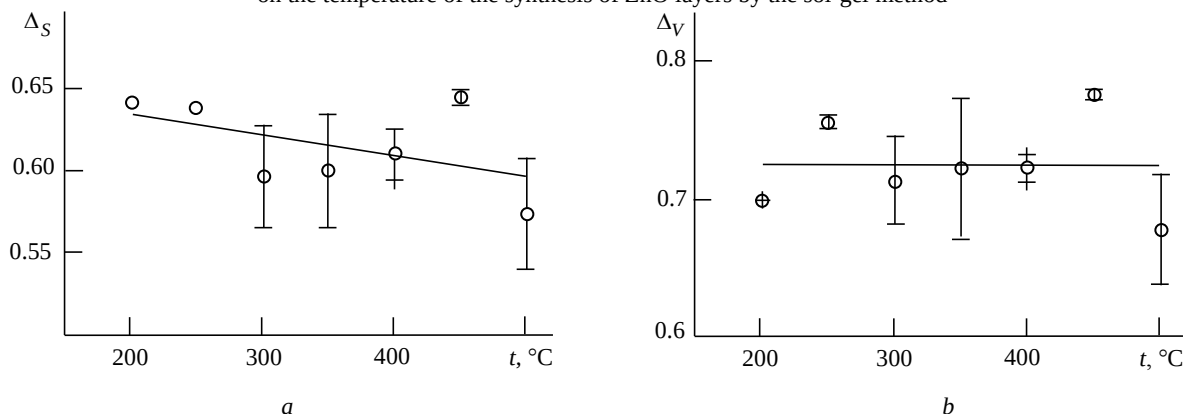


Fig. 3. Dependences of fractal ordering parameters for surface area Δ_S (a) and volumes of nanoforms Δ_V (b) on the temperature of the synthesis of ZnO layers by the sol-gel method

strate is shown in Fig. 2, 3 for the constant time of the synthesis process. Straight lines on the correlation dependencies are drawn by the least squares method applied to each set of experimental data. The values of our estimates of the accuracy of finding the values of the corresponding MF surface parameters, which are made in accordance with the above considerations, are also presented there.

The data in Fig. 2, 3 demonstrate the existence of stable relationships between the MF parameters and the temperature of the process of layer synthesis for both the distribution of the surface area of nanoforms and their volumes. It proves that it is precisely the values of the MF parameters that quantitatively tracked and described the differences in the surface structure between samples of the same composition, but formed at different temperatures. This quantitative result is confirmed by the visual analysis of images in Fig. 1. Therefore, the graph shows that the crystallite sizes on the surface of the layers increase slightly, which ensures the appearance on the layer surface of a larger proportion of areas with a flat surface.

The data in Fig. 2, 3 quantitatively show that with increasing annealing temperature the space dimension of the surface area of the polycrystalline film (number D_{S0}) decreases, approaching the number "two", and the corresponding parameter for their volumes (number D_{V0}) increases, approaching "three". Such a course of the considered dependences reflects the tendency of the system to form flat surfaces faster with increasing temperature on the substrate when the rate of surface reactions increases.

Fig. 3 shows the data on the ordering parameters Δ for the surface area and volumes of nanoforms that form on the surface of the ZnO layer at various synthesis temperatures. The data in Fig. 3 show a stable tendency of the system to decrease the width of its MF spectrum with increasing growth temperature. Such a course of the considered dependence reflects the desire of the system to form "monofractal" structures on the surface, which are characterized by a decrease in the fractal ordering parameters and a compression of the spectrum of Renyi's numbers. Thus, it can be argued that the obtained data on the MF parameters of the system quantitatively confirmed that an increase in the temperature of the synthesis of layers in the indi-

cated range leads to an increase in planarity of the obtained layers.

It is possible to control the surface morphology or, equivalently, the parameters of the surface micro-relief by introducing another isomorphic component into the material. The introduction of cadmium into the initial growth system, which was accompanied by the synthesis of the $(\text{CdO})_x(\text{ZnO})_{1-x}$ solid solution, allowed us to evaluate the effect of the third component on the state of the surface of the grown layer. The process of obtaining the specified solid solution was consistent with the technology described above. The only difference was the change in the concentration of the $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ dopant by the required fraction of $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$. The technique for obtaining SEM images and calculating the parameters of the MF spectrum remained the same. To solve this problem, the largest number of experiments on the synthesis of layers was carried out with a sol of the following composition $20\text{CdO} \cdot 30\text{ZnO} \cdot 50\text{SiO}_2$ wt. %.

The data on the dependences of the Renyi's numbers and the disordering parameters on the synthesis temperature for layers obtained from sols of the indicated composition are presented in Fig. 4, 5. On the same figures, dashed lines for comparison represent the averaged functional dependences for similar data describing the surfaces of the layers of the ZnO system.

As expected, the values of the Renyi's numbers and the fractal ordering parameters for the layers of the solid solution, in general, turn out to be large in value or remain practically close to their counterparts for the binary system. Such a course of the dependence under consideration, apparently, is a direct consequence of the appearance in ZnO–CdO solid solutions of excess mixing entropy, which is characteristic of mixtures of substances. The appearance of the configuration component of the entropy of mixing is reflected in the values of the Renyi's numbers, whose interrelations with various components of the entropy of the system are known [6]. Therefore, the experimental data on the Renyi's numbers obtained for solid solutions should be considered as confirmation of the theoretical relationship between the Renyi's numbers and the configuration component of the entropy of the system.

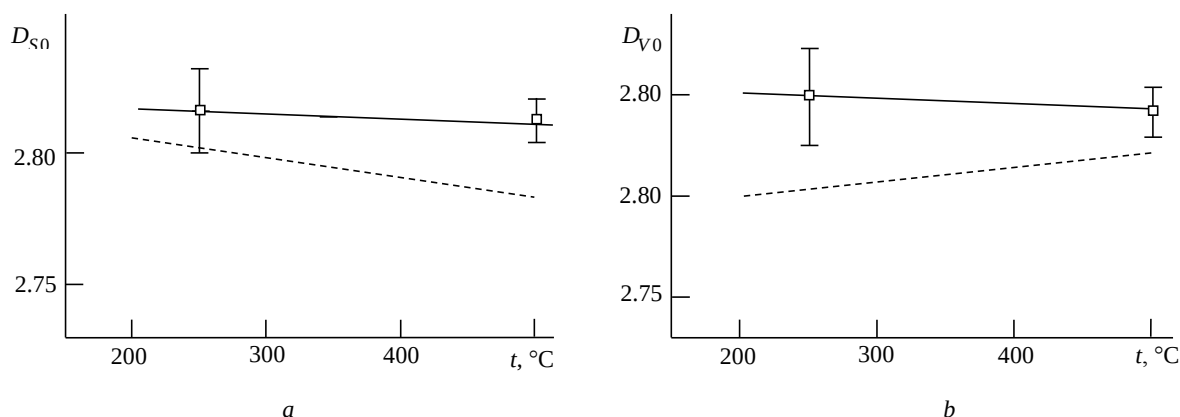


Fig. 4. Dependences of the Renyi's numbers for surface area D_{S0} (a) and volumes of nanoforms D_{V0} (b) on the temperature of layer synthesis in the ZnO–CdO system by the sol-gel method. The composition of the initial sol: 20 CdO • 30ZnO • 50 SiO₂ wt. %. The dashed lines correspond to similar data for the layers in the ZnO system

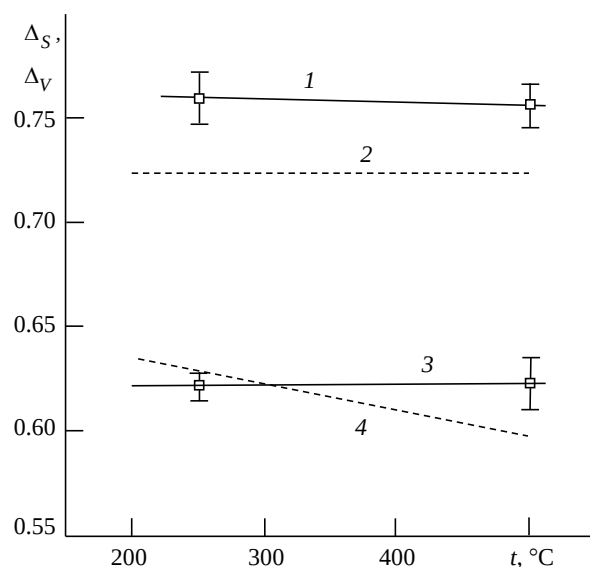


Fig. 5. Dependences of the fractal ordering parameters for the volumes of nanoforms Δ_V (1, 2) and for their surface area Δ_S (3, 4) on the temperature of layer synthesis in the ZnO–CdO system by the sol-gel method. The dashed lines (2, 4) correspond to similar data for ZnO layers

The effect of fractal structure on the surface energy of the layer. The obtained MF data should be used on the fractal parametrization of film surfaces to implement an attempt to thermodynamically describe the energy state of a surface having a fractal relief. In [7], using a formal approach, it was shown that the chemical potential of the surface of the layer is connected with its geometric (fractal) characteristics by the expression:

$$\mu^S = dG_S^{\text{ex}} / dn = (\alpha \cdot M / \rho) B, \quad (1)$$

where dG_S^{ex} is the variation of Gibbs free excess energy due to the appearance of the interface by the

dS area, α is the specific surface energy of the interface; dn – a change on the number of moles of a substance due to a change in its volume dV ; ρ , M – density and molecular weight of solid phase;

$$B = \frac{N_S D_{S0}}{N_V D_{V0} l^{(D_{V0}-D_{S0})}} - \text{coefficient depending}$$

on surface geometry (geometric coefficient); N_S and N_V – coefficients that take into account the dimensions of the corresponding parameters in theoretical dependencies: $S = N_S l^{D_{S0}}$; $V = N_V l^{D_{V0}}$.

The results on the Renyi's numbers for the surface area and volumes of nanoforms allow us to quantitatively analyze the effect of the fractal structure of the surface on the value of its surface energy. Naturally, this analysis will be performed with respect to the geometric coefficient, since it is the parameter that contains data on the fractal characteristics of the surface, and it is its form that should determine the main trends in the thermodynamic behavior of the considered parameter of the system.

Fig. 6 shows the results of calculating the dependence of the coefficient B on the characteristic linear size of the fractal structure for various temperatures of the synthesis of the ZnO layer. These data were obtained by direct substitution of the values of Renyi's numbers for the surface area and volumes of nanoforms in the formula (1).

The fundamentally important result on the behavior of the geometric coefficient B should be recognized as follows. Indeed, according to the calculations, the effect of the fractal structure of the surface begins to increase significantly only at very small

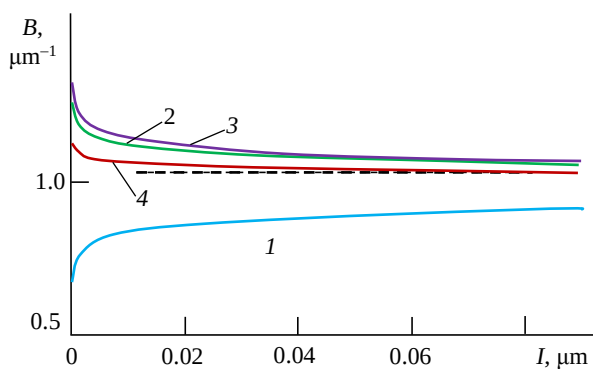


Fig. 6. Dependence of the geometric factor B on the characteristic size of the fractal formation l on the surface of the ZnO layers obtained by the sol-gel method at various synthesis temperatures: 1 – $t = 200$ °C; 2 – $t = 300$ °C; 3 – $t = 350$ °C; 4 – $t = 450$ °C

values of the characteristic dimensions of the structure. This is a region of linear dimensions less than $0.01 \mu\text{m}$. For the same conditions, calculations using an expression $B \approx 1/l$ that takes into account the energy of formation of a spherical interface suggest an extremely sharp increase in the surface energy of the system [6–7]. Such a situation with an extremely sharp increase in the fraction of surface energy in the overall energy balance of the system still seems unlikely.

It is noteworthy that according to the results of calculations with relatively large linear dimensions of the structure (l more than $0.02 \mu\text{m}$) the coefficient B taking into account the fractal structure of the surface practically ceases to depend on the latter. This means that the contribution to the total energy of the solid phase due to the fractal structure with significant linear dimensions of its elements will create only a small additive to the total phase energy.

Attention should be paid to the anomalous behavior of the dependence of the geometric coefficient on the characteristic size of the fractal structure for a temperature of 200 °C (curve 1 in Fig. 6). If, for curves 2–4, the result expected from theoretical positions is observed, according to which, with a decrease in size and, accordingly, curvature of their interfaces, the energy of the system should increase, then this curve assumes the opposite effect. This situation was manifested due to the fact that, according to the estimates obtained, at the lowest synthesis temperature, the Renyi's number for the surface area

turned out to be large in terms of the Renyi's number for their volumes. This situation changed the sign of the exponent in the analyzed dependence (1) and led to a decrease in the contribution of fractal geometry to the surface energy of the system. Physically, this ratio between the indicated Renyi's numbers corresponds to the existence of a very curved and pored surface with an increased area, which was formed at a super low temperature of layer synthesis.

Conclusion.

1. The conditions for obtaining high-quality layers of ZnO and ZnO–CdO systems by the sol-gel method at various temperatures of final annealing were found and implemented. The surface of the synthesized layers was studied by the SME method depending on the temperature of their final formation.

2. Multifractal analysis is applied to processing SEM images of the surface of the obtained layers deposited by the sol-gel method. The MF spectra from surface areas and volumes of relief-forming nanoforms formed on their surface were calculated and analyzed. The dependences of the MF spectral parameters on the surface area and on the volumes of nanoforms on the layer surface on the temperature of their final annealing are found.

3. The analysis of the relationships between the Renyi's numbers, the fractal disordering parameter and the synthesis temperature of the layers quantitatively confirms the fact that with an increase in the annealing temperature from 200 to 500 °C a more planar surface is formed with a higher degree of fractal symmetry of the geometric parameters of nanoforms. The latter quantitatively reflects the fact of obtaining layers with increased structural perfection with increasing temperatures of their final annealing in the indicated temperature range.

4. The found MF parameters of the surface relief were used to evaluate the contribution of fractal geometry to the surface energy of the layers. It is shown that taking into account the fractal geometry of the surface of the layers of ZnO and CdO–ZnO systems leads to a relatively weak dependence of the surface energy on the characteristic linear sizes of surface nanoforms.

Authors' contribution

Wojciech Sadowski, statement of a scientific problem, general guidance, discussion of results.

Pavel P. Moskvina, statement of a scientific problem, general guidance on the mathematical support of the problem, discussion of the results.

Vyacheslav B. Kryzhanivskyy, mathematical and software problems.

Galyna V. Skyba, performing experiments on the synthesis of semiconductor nano layers, discussion of the results.

Oleksandr I. Prylypko, software for multifractal analysis of spatial forms.

References

1. Yang L., Zhou J., Larbot A., Persin M. Preparation and characterization of nano-zinc oxide. *J. of Materials Processing Technology*. 2007, vol. 189, iss. 1–3, pp. 379–383. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.02.007
2. Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications. Ed. by S. Sakka (Prof. Emeritus of Kyoto University). Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2005, vol. 1–3.
3. Ponomareva A. A., Moshnikov V. A., Maslova O. A., Yuzyuk Yu. I., Suchanek G. Effect of thermal annealing on the surface of sol-gel prepared oxide film studied by atomic force microscopy and Raman spectroscopy. *Glass Phys. Chem.* 2014, vol. 40, iss. 1, pp. 99–105. doi: 10.1134/S1087659614010192
4. Raoufi D. Fractal analyses of ITO thin films: A study based on power spectral density. *Physica B. Condensed Matter*. 2010, vol. 405, iss. 1, pp. 451–455. doi: 10.1016/j.physb.2009.09.005
5. Moskvina P. P., Skyba G. V., Dobriakov V. L., Kolodii M. A., Rashkovetskyi L. V., Kolomys O. F., Rarata S. V. Sol-gel synthesis, surface morphology and spectral properties of ZnO ultrathin films on a silicon single crystal. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2018, vol. 4, pp. 36–42. (In Ukr.) Available at: <http://vhht.dp.ua/wp-content/uploads/pdf/2018/4/Moskvina.pdf> (accessed 12.11.2020)
6. Moskvina P., Kryzhanivskyy V., Rashkovetskyi L., Lytvyn P., Vuichik M. Multifractal analysis of areas of spatial forms on surface of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te-Si}$ (111) heterocompositions. *J. Cryst. Growth*. 2014, vol. 404, pp. 204–209. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2014.07.012
7. Moskvina P., Kryzhanivskyy V., Rashkovetskyi L., Lytvyn P. Multifractals spectrums for volumes of spatial forms on surface of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te-Si}$ (111) heterostructures and estimation of the fractal surface energy. *J. Cryst. Growth*. 2016, vol. 450, pp. 28–33. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.05.035
8. Moskvina P., Kryzhanivskyy V., Rashkovetskyi L., Morozov A., Lytvyn P. Invariance of multifractal spectrums of spatial forms on the surface of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te-Si}$ heterocompositions synthesized by electron beam epitaxy and hot wall epitaxy. *J. Cryst. Growth*. 2017, vol. 475, pp. 144–149. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2017.06.010
9. Moskvina P. P., Kryzhanivskyy V. B., Rashkovetskyi L. V., Lytvyn P., Vuichik N. V. Multifractal parameterization of spatial forms on the surface of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te-Si}$ heterocompositions & its relationship with the conditions of the synthesis of layers. *Russian J. of Physical Chemistry*. 2014, vol. 88, iss. 8, pp. 1375–1381. doi: 10.1134/S0036024414080196
10. Moskvina P. P., Kryzhanivskyy V. B., Rashkovetskyi L. V., Vuichik N. V. Multifractal parametrization for the volume of space forms on surfaces of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te-Si}$ (111) heterocompositions and estimating the energy of a surface with fractal structure. *Russian J. of Physical Chemistry A*. 2016, vol. 90, iss. 5, pp. 780–787. doi: 10.1134/S003602441605023X
11. Moskvina P., Balytska N., Melnychuk P., Rudnitskyi V., Kyrylovich V. Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 86, iss. 2/1, pp. 9–15. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96403
12. Feder J. *Fractals, Physics of Solids and Liquids*, Plenum Press. New York, 1988, 183 p.
13. Vstovsky G. V. Transform information: a symmetry breaking measure. *Found. Phys.* 1997, vol. 27, iss. 10, pp. 1413–1444. doi: 10.1007/BF02551520
14. Kolmakov A. G., Vstovsky G. V., Bunin I. G. Introduction to multifractal parameterization of material structures. M., Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001, 116 p. (In Russ.)
15. Vstovsky G. V. *Elements of information physics*. M., MGU, 2002, 260 p.

Information about the authors

Wojciech Sadowski, Dr. Sci (Phys.-Math.) (2001), Professor (2002) of Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: technology of complex semiconductor materials.

Address: Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, Gdańsk, Poland 80-952

E-mail: w.sadowski.pg@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1229-3723>

Pavel P. Moskvina, Dr. Sci (Phys.-Math.) (2000), Professor (2001) of Zhytomyr Polytechnic State University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: theoretical problems of thermodynamics and technology of complex semiconductor materials.

Address: Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska St., Zhytomyr, 10005 Ukraine

E-mail: moskvina Pavel56@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5034-8097>

Vyacheslav B. Kryzhanivskyy, Cand. Sci (Eng.) (2002), Associate Professor (2004) of Zhytomyr Polytechnic State University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: applied mathematics and software for computational problems.

Address: Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska St., Zhytomyr, 10005 Ukraine

E-mail: kryzhanivskyy.vyacheslav@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-0639-0754>

Galyna V. Skyba, Cand. Sci (Eng.) (2002), Associate Professor (2004) of Zhytomyr Polytechnic State University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: superthin films, synthesized by various nanotechnologies.

Address: Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska St., Zhytomyr, 10005 Ukraine

E-mail: skybagalyna26@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8765-8849>

Oleksandr I. Prylypko, Cand. Sci (Phys.-Math.) (1991), Associate Professor (1996) of Zhytomyr Polytechnic State University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: mathematical modeling, theoretical and algebraic analysis of the equations of mathematical physics.

Address: Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska St., Zhytomyr, 10005 Ukraine

E-mail: poizh77@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0783-1942>

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.2:51-7

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68>

Методическое обеспечение для применения метода мажоритарного резервирования измерительных каналов

Н. В. Минчев✉

Акционерное общество «Научно-производственная фирма "УРАН-СПб"»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ minivik@mail.ru

Аннотация

Введение. Для опасных производств уровень надежности оборудования информационно-измерительных систем должен соответствовать требованию, что вероятность отказа является практически невозможным событием, т. е. равна приблизительно 10^{-6} . Для реализации данного требования существуют различные способы повышения уровня надежности, одним из которых является резервирование. Оно делится на несколько видов в зависимости от влияющих факторов, таких, как режим работы объекта, типы отказов, кратность и т. п. Мажоритарное резервирование в измерительной технике, в частности в измерительных каналах, используется редко, так как данный метод был разработан для повышения надежности в дискретных цифровых устройствах. До настоящего времени соответствующее математическое обеспечение для применения мажоритарного резервирования измерительных каналов аналоговых величин отсутствовало. Вследствие этого возникла необходимость в его разработке.

Цель работы. Разработка методического обеспечения для применения метода мажоритарного резервирования, позволяющего повысить достоверность результатов измерений.

Материалы и методы. Проанализированы отечественные и зарубежные источники информации за последние 40 лет, связанные с обработкой малых выборок при проектировании измерительных каналов для информационно-измерительных систем. Применен непараметрический ранговый критерий Манна–Уитни для обработки малых выборок, использовалось математическое моделирование, математический аппарат теории измерений и теории систем.

Результаты. Реализована модель измерительного модуля с избыточной структурой. Рассмотрены параметрические и непараметрические ранговые критерии. Разработан алгоритм, позволяющий выявить отказ канала измерительного модуля с избыточной структурой. Вычислительная сложность алгоритма оценивается полиномом второй степени.

Заключение. Рассмотренные возможности использования непараметрических ранговых критериев для работы с выборками малого объема, а также диагностические ситуации для различных комбинаций данных критериев позволяют принимать статистически обоснованное решение о состоянии измерительного канала. В перспективе планируется использовать данный метод при диагностическом контроле исправности оборудования технологических процессов, связанных с сжиганием топлива, а именно в котельных установках и установках термического уничтожения отходов.

Ключевые слова: мажоритарное резервирование, резервирование, измерительный канал температуры, модель измерительного канала, непараметрические критерии

Для цитирования: Минчев Н. В. Методическое обеспечение для применения метода мажоритарного резервирования измерительных каналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 59–68. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.10.2020; принята к публикации после рецензирования 25.11.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



Methodological Support for Applying the Method of Majority Reservation in Measuring Channels

Nikadim V. Minchev ✉

Joint Stock Company Scientific and Production Company "URAN-SPb", St Petersburg, Russia

✉ minivik@mail.ru

Abstract

Introduction. For hazardous industries, the reliability of information and measuring equipment must ensure an almost complete absence of failure events, with their probability as low as 10^{-6} . This requirement can be satisfied using various approaches, one of which is reservation. Reservation methods are classified into several types depending on such factors, as the operating mode of an object, failure types, frequency rate, etc. Majority redundancy schemes are rarely used in measuring equipment, particularly in measuring channels, largely because this method was initially aimed at improving the reliability of discrete digital devices. Thus far, no mathematical support for applying the method of majority reservation in measuring channels of analogue values has been developed. This gap determined the relevance of this study.

Aim. To develop a methodological support for applying the method of majority reservation with the purpose of improving the level of measurement accuracy.

Materials and methods. Both Russian and foreign sources published over the past 40 years on the topic of processing small samples when designing measuring channels for information and measuring systems were reviewed. The nonparametric Mann-Whitney rank test was applied to process small samples. Other research methods included mathematical modelling, as well as the mathematical apparatus of measurement theory and systems theory.

Results. A measuring module with a redundant structure was simulated. Parametric and nonparametric rank criteria were considered. An algorithm allowing identification of the failure of a channel in a measuring module with a redundant structure was developed. The computational complexity of the developed algorithm is estimated by a polynomial of the second degree.

Conclusion. The use of nonparametric rank criteria for processing small samples, as well as diagnostic situations for various combinations of these criteria, supports statistically grounded decision on the state of measuring channels. In the future, this method will be applied for diagnostic control of the serviceability of technological equipment used in fuel combustion, namely in boiler plants and installations for thermal waste destruction.

Keywords: majority redundancy, redundancy, temperature measurement channel, measurement channel model, nonparametric criteria

For citation: Minchev N. V. Methodological Support for Applying the Method of Majority Reservation in Measuring Channels. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 59–68. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68

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

Submitted 07.10.2020; accepted 25.11.2020; published online 25.02.2021

Введение. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки (ГОСТ 27.002–2015). Для опасных производств уровень надежности должен соответствовать требованию, что вероятность отказа является практически невозможным событием. Для выполнения или хотя бы приближения к возможно-

сти реализации данного требования существуют различные способы повышения уровня надежности, одним из которых является резервирование [1].

В свою очередь резервирование делится на несколько видов в зависимости от влияющих факторов, таких, как режим работы объекта, типы отказов, кратность и т. п. (ГОСТ 27.002–2015) [1].

Горячее резервирование с нечетной кратностью без восстановления, или другое, более рас-

пространенное, название – мажоритарное резервирование – это один из видов резервирования, при котором в рабочем режиме находится нечетное количество (не менее трех) однотипных элементов и результатом работы объекта принимается одинаковый результат работы большинства основных элементов. Данный вид резервирования в основном применяется в вычислительных устройствах и системах из-за простоты реализации мажоритарного элемента, а также из-за дискретности используемых переменных (ГОСТ 27.002–2015) [1].

Мажоритарное резервирование в измерительной технике, в частности в измерительных каналах, используется редко, так как измеряемая величина является аналоговой.

Статья посвящена разработке методического обеспечения для применения метода мажоритарного резервирования в измерительных каналах. Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

- создать модель измерительного канала;
- проанализировать параметрические и непараметрические критерии;
- разработать алгоритм, позволяющий выявить отказ канала измерительного модуля с избыточной структурой.

Методы. В измерительном модуле (ИМ) избыточность предполагается за счет количества измерительных каналов (ИК) (ГОСТ 27.002–2015) [1]. На рис. 1 [2] представлен измерительный модуль температуры с избыточной структурой. Измерительный канал включает в себя:

- ПИП – первичный измерительный преобразователь;
- ИТ – источник тока;

- НП – нормирующий преобразователь;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- ВУ – вычислительное устройство;
- МЭ – мажоритарный элемент;
- И – индикатор.

Именованные значения физической величины (ФВ), получаемые от измерительных каналов, поступают на МЭ, внутри которого, в зависимости от метода, происходит проверка получаемых данных на допустимое расхождение относительно друг друга. Данная проверка проводится для того, чтобы выявить отказ в измерительном модуле. Под отказом понимается нарушение работоспособности объекта, при котором система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции, другими словами – происходит сбой в работе устройства или системы [3]. Если возникает отказ, т. е. расхождение измеренных значений является значимым, то данный факт регистрируется, что отображается на индикаторе И.

На основании структурной схемы была создана модель измерительного модуля в среде программирования LabView. Структурная схема данной модели (рис. 2) включает в себя несколько основных блоков:

1. ПИП и ИТ – блок, имитирующий работу термопреобразователя сопротивления и источника тока.
2. Измерительный канал – блок, имитирующий работу НП, АЦП и часть ВУ, отвечающего за функцию обратного преобразования.
3. Коррекция – блок, имитирующий часть ВУ, отвечающего за коррекцию нелинейности полинома ПИП.
4. Мажоритарный элемент, принципы работы которого описаны далее.

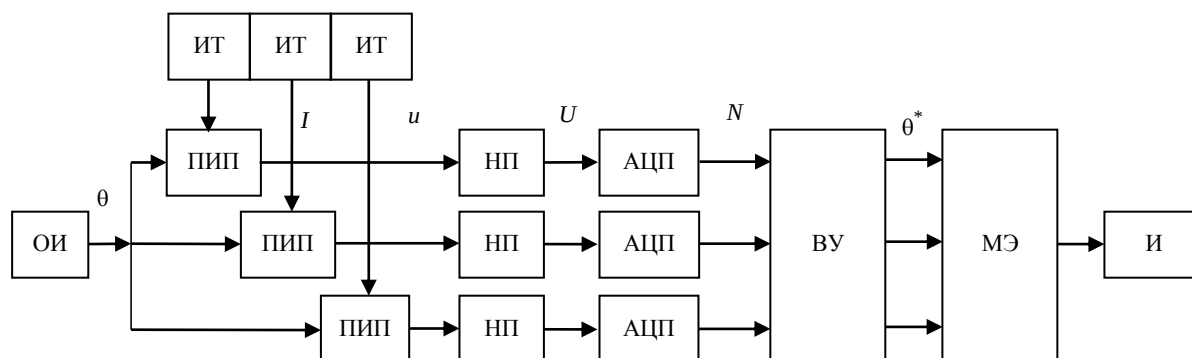


Рис. 1. Измерительный модуль температуры с избыточной структурой

Fig. 1. Temperature measuring module with redundant structure

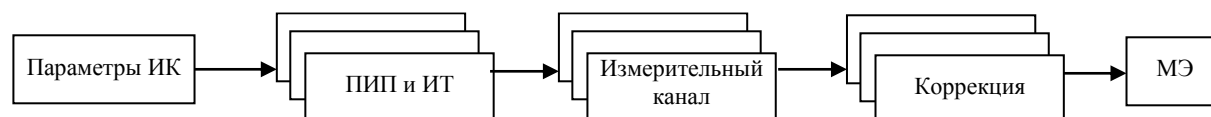


Рис. 2. Структурная схема модели измерительного модуля

Fig. 2. The block-diagram model measuring module

В данной модели могут быть заданы несколько основных параметров измерительного канала.

К ним относятся:

- градуировка;
- класс точности;
- максимальное входное напряжение АЦП (3.3 В);
- разрядность;
- смещение измеряемых значений (систематический дрейф);
- температурный коэффициент α ;
- тип терморезистора.

В свою очередь каждый из блоков модели представляет собой самостоятельную программу.

Блок ПИП и ИТ состоит из трех частей:

1. *Градуировка.* Данная часть выдает 2 основных параметра канала в зависимости от выбранной градуировочной шкалы (G), а именно номинальное сопротивление при 0 °C (R_0) и ток источника (I), которые определены в ГОСТ 6651–2009. Математическая модель данной части записывается следующим образом:

$$\begin{cases} R_0(G) = r; \\ I(G) = I + 0.00005 + 0.00005[2\text{rand}(t) - 1], \end{cases}$$

где r – число, выбираемое из ряда [100, 500]; I – число, выбираемое из ряда [0.001, 0.0025]; $\text{rand}(t)$ – функция генератора случайных чисел в диапазоне (0; 1); t – номер итерации; $0.00005 + 0.00005[2\text{rand}(t) - 1]$ – аддитивная составляющая погрешности.

2. *Допуски и диапазоны измерений.* Данная часть выдает 3 параметра в зависимости от выбранного типа терморезистора (ТТ) и класса точности (С), а именно максимальную и минимальную температуру ($\theta_{\max}$ и $\theta_{\min}$), а также мультипликативную составляющую погрешности (Δ) в предусмотренном классом точности диапазоне. Математическая модель данной части будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta(\text{ТТ}, \text{С}) = a[2\text{rand}(t) - 1] + b|\theta|; \\ \theta_{\min}(\text{ТТ}, \text{С}) = \theta_1; \\ \theta_{\max}(\text{ТТ}, \text{С}) = \theta_2, \end{cases}$$

где a и b – коэффициенты, значения которых определяются по табл. 2 (ГОСТ 6651–2009);

θ_1 – число, выбираемое из ряда [–196, –180, –100, –60, –50, –30, 0]; θ_2 – число, выбираемое из ряда [120, 150, 180, 200, 250, 300, 450, 500, 600, 660].

3. *Преобразование температура/сопротивление.*

Данная часть выдает 3 параметра в зависимости от выбранного типа терморезистора и параметра α , а именно сопротивление при максимальной и минимальной температурах ($R_{\max}$ и $R_{\min}$), а также текущее сопротивление (R). Таким образом, математическая модель данной части имеет вид

$$R(T) = \begin{cases} R(\text{ТТ}, \alpha, \theta) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta + B\theta^d (\theta + 6.7)^h}{1 + C\theta^f (\theta - 100)^g} \right]; \\ R_{\min}(\text{ТТ}, \alpha) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta_{\min} + B\theta_{\min}^d (\theta_{\min} + 6.7)^h}{1 + C\theta_{\min}^f (\theta_{\min} - 100)^g} \right]; \\ R_{\max}(\text{ТТ}, \alpha) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta_{\max} + B\theta_{\max}^d (\theta_{\max} + 6.7)^h}{1 + C\theta_{\max}^f (\theta_{\max} - 100)^g} \right], \end{cases}$$

где A, B, C – коэффициенты; d, h, f, g – показатели степени, значения которых указаны в соответствии с ГОСТ 6651–2009.

Блок измерительного канала включает математические модели трех устройств: нормирующего преобразователя, АЦП и части вычислительного устройства, выполняющего функцию обратного преобразования.

В качестве математической модели нормирующего преобразователя выступает следующая система:

$$U(R) = \begin{cases} u = RI; \\ k = U_{\max} / (R_{\max} I); \\ U = ku; \\ U_0 = kR_0 I; \\ U_{\min} = kR_{\min} I, \end{cases}$$

где u – измеряемое напряжение, получаемое с ПИП; k – нормирующий коэффициент; U – нормированное измеряемое напряжение, получаемое с НП; $U_{\max}$ – максимальное входное напряжение АЦП (3.3 В); U_0 и $U_{\min}$ – входные напряжения АЦП при R_0 и $R_{\min}$ соответственно, также получаемые с НП.

Система, представляющая математическую модель АЦП, записывается следующим образом:

$$N(U) = \begin{cases} N_{\max} = 2^n - 1; \\ N = \frac{UN_{\max}}{U_{\max}}; \\ N_0 = \frac{U_0 N_{\max}}{U_{\max}}; \\ N_{\min} = \frac{U_{\min} N_{\max}}{U_{\max}}, \end{cases}$$

где n – разрядность АЦП; $N_{\max}$ – максимальный код; N – выходной код; N_0 и $N_{\min}$ – выходной код АЦП при U_0 и $U_{\min}$ соответственно.

Математическая модель вычислительного устройства, отвечающего за функцию обратного преобразования, записывается в следующем виде:

$$\theta^*(N) = \begin{cases} \theta^* = \frac{|\theta_{\min}|(N - N_{\min})}{(N_0 - N_{\min})} + \theta_{\min}, & \theta_{\min} \leq \theta < 0; \\ \theta^* = \frac{|\theta_{\max}|(N - N_0)}{(N_{\max} - N_0)}, & 0 \leq \theta \leq \theta_{\max}. \end{cases}$$

Блок коррекции включает математическую модель части вычислительного устройства, отвечающего за уменьшение систематической составляющей погрешности вследствие нелинейности получаемых данных. Данная модель состоит из двух частей:

1. *Коррекция нелинейности полинома ПИП.* Данная часть выдает 2 параметра в зависимости от выбранного типа ТТ и параметра α , а именно постоянный коэффициент (K) и абсолютную погрешность (DC) при температуре в середине от-

рицательного (положительного) поддиапазона ($\theta_{\text{спд}}$). Математическая модель данной части имеет вид

$$\begin{cases} \theta_{\text{спд}} = \frac{\theta_{\text{ext}}}{2}; \\ [\theta_c] = \left[\frac{\theta_{\text{ext}}}{2}; \frac{\theta_{\text{ext}}}{2} - 1; \frac{\theta_{\text{ext}}}{2} + 1 \right]; \\ R_{ci}(TT, \alpha) = R_0 \left[1 + A\theta_{ci} + B\theta_{ci}^d; (\theta_{ci} + 6.7)^h + \right. \\ \left. + C\theta_{ci}^f; (\theta_{ci} - 100)^g \right]; \\ N_{ci} = \frac{kR_{ci}(TT, \alpha)I}{U_{\max}} N_{\max}; \\ \theta_i^* = \frac{|\theta_{\max}|(N_{ci} - N_{\min \text{ пд}})}{(N_{\max \text{ пд}} - N_{\min \text{ пд}})} + \theta_{\min}; \\ DC = \frac{\sum_{i=1}^3 (\theta_i^* - \theta_{ci})}{3}; \\ K = -\frac{DC}{\theta_{\text{спд}}^2}, \end{cases}$$

где θ_{ext} – максимальное по модулю значение температуры положительного (отрицательного) поддиапазона; $N_{\max \text{ пд}}$ и $N_{\min \text{ пд}}$ – максимальное и минимальное значения кода положительно-го (отрицательного) поддиапазона.

2. *Вычисление скорректированных значений.* Данная часть выдает скорректированные значения температуры θ_k^* . Математическая модель данной части может быть записана в виде

$$\begin{cases} F = K(\theta - \theta_c)^2 + DC; \\ \theta_k^* = \theta^* - F. \end{cases}$$

На сегодняшний день существует несколько методов мажоритарного резервирования, основанных на различных критериях, которые можно разделить на 2 группы:

- **Параметрические:**

- среднее значение, которое может быть вычислено по формуле $\theta^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i^*$, где n – число каналов;
- центральная переменная, т. е. выбор медианы из переменных θ^* ;

– средневзвешенное значение, которое вычисляется для трех переменных с помощью весовых коэффициентов по формуле

$$\theta^* = \left(\sum_{i=1}^3 w_i \theta_i^* \right) / \left(\sum_{i=1}^3 w_i \right).$$

Весовые коэффициенты рассчитываются по формуле

$$w_i = \frac{1}{1 + \prod_{i=1, j=1, i \neq j}^3 \frac{(\theta_i^* - \theta_j^*)^2}{\beta^2}},$$

где β – параметр, рассчитываемый по формуле [4]

$$\beta = \min_{i=1, j=1, i \neq j}^3 (\theta_i^* - \theta_j^*).$$

Основным недостатком для использования параметрических критериев является требование о нормальности закона распределения измеряемой величины. Другим же недостатком является наличие требования к объему выборки, а именно 20–30 значений в одной выборке.

• Непараметрические [5]:

- критерий Манна–Уитни;
- критерий Краскелла–Уоллиса;
- критерий Колмогорова–Смирнова;
- критерий Вальда–Вольфовица;
- критерий Уилкоксона для зависимых совокупностей;
- критерий знаков.

Непараметрические критерии менее требовательны к закону распределения измеряемой величины, а также позволяют работать с выборками малого объема (от двух значений). Так как в описываемом случае предполагается работа с выборками малого объема, закон распределения которых неизвестен, далее будут использоваться непараметрические критерии.

В рассматриваемом случае выборки являются независимыми, их количество равно трем, что соответствует количеству измерительных каналов, и объем каждой выборки составит 10 значений в соответствии с результатом анализа критерия [6, 7]. В свою очередь, работа с независимыми выборками является значительным ограничением при использовании критерия Уилкоксона для зависимых совокупностей и критерия знаков, что отражено в табл. 1.

Вероятность появления одинаковых результатов измерения достаточно мала, вследствие этого серийные критерии, такие, как критерий Вальда–

Таблица 1. Сравнение непараметрических критериев
Table 1. Comparison of nonparametric criteria

Критерий	Тип выборок	Количество рассматриваемых выборок	Минимальный объем выборок
Манна–Уитни	Независимые	2	3:5 или 4:4 или 2:8
Краскелла–Уоллиса	Независимые	3	2:2:2
Колмогорова–Смирнова	Независимые	2	10:10
Вальда–Вольфовица	Независимые	2	4:6
Уилкоксона для зависимых совокупностей	Зависимые	2	6:6
Знаков	Зависимые	2	6:6

Вольфовица и критерий Колмогорова–Смирнова, не рассматриваются.

Критерий Краскелла–Уоллиса позволяет установить факт отличия выборки от генеральной совокупности, но не дает возможности идентифицировать отклоняющуюся выборку [5–11].

Исходя из вышеизложенного, в данной статье рассматривается критерий Манна–Уитни, который позволяет проверить гипотезу о принадлежности двух независимых выборок разного размера малого объема к одной совокупности. С другой стороны, при использовании критерия Манна–Уитни для парной проверки выборок появляется возможность выявления отклоняющейся выборки. На основании этого был разработан алгоритм выявления отказа канала в измерительном модуле.

Алгоритм. Исходное состояние – нет ни одного значения в канале [6–8].

1. Накопление 10 значений с каждого канала в измерительном модуле (т. е. 30 значений).

2. Попарная проверка по критерию Манна–Уитни, т. е. проверка по данному критерию выборок с 1-го и 2-го; 1-го и 3-го; 2-го и 3-го каналов.

3. Если расхождение значимо в двух из трех либо во всех трех парах, зарегистрировать ситуацию как один из случаев в табл. 2 (0 – расхождение незначимо; 1 – расхождение значимо; в последнем случае ошибка регистрируется во всех трех каналах).

4. Вычислить процент ошибки для каждого канала по формуле $E_g = \frac{n_e}{n} 100$, где n_e и n – количество зарегистрированных случаев в соответствии с табл. 2 и общее количество измерений

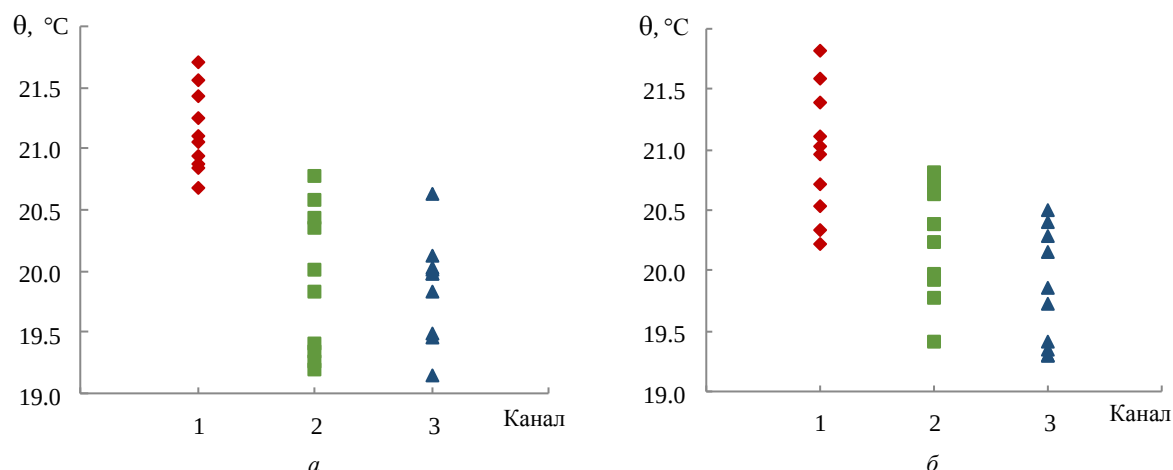


Рис. 3. Возможные случаи при проверке по критерию Манна–Уитни: а – 1-й случай из табл. 2 (2-й и 3-й случаи аналогичны); б – 4-й случай

Fig. 3. There may be cases when checking for the Mann–Whitney test: а – 1 case from table 2 (2 and 3 cases are similar); б – 4 case

в одном отличающемся канале. Пример возможных случаев, представленных в табл. 2, иллюстрируется на рис. 3.

Таблица 2. Возможные случаи при проверке по критерию Манна–Уитни

Table 2. There may be cases when checking for the Mann–Whitney test

Отличающийся канал	Проверяемые выборки		
	1 и 2	1 и 3	2 и 3
1	1	1	0
2	1	0	1
3	0	1	1
Невозможно определить	1	1	1

5. Сравнить вычисленный процент с допустимым [9, 10], который может быть получен из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{гд} = -0.47n^3 + 0.92n^2 - 61.2n + 153.4, \\ 1 \leq n < 10; \\ E_{гд} = -0.5n + 25, & 10 \leq n \leq 25; \\ E_{гд} = -0.005n + 13.5, & 25 < n < 100; \\ E_{гд} = 8.5, & n \geq 100, \end{cases}$$

где $E_{гд}$ – допустимый процент ошибки. Данная система уравнений была получена экспериментальным путем при пропуске трех различных сигналов через модель с различными значениями уровня смещения сигнала относительно входного. (без смещения, ± 0.3 , ± 0.5 , ± 0.8 , ± 1 , ± 2 , ± 3 °C). Процент ошибки сигналов со смещениями меньше ± 0.3 °C при условии изменения сигналов в диапазоне 20...600 °C практически не отличается от про-

цента ошибки сигнала без смещения. На рис. 4 приведен график для одного из тестовых сигналов.

6. Вычисление значения измеряемой величины:

а) если $E_{г} \leq E_{гд}$, то можно считать, что все измерительные каналы находятся в рабочем состоянии, а погрешность – в допустимых пределах. Тогда значение измеряемой величины может быть вычислено как среднее по формуле:

$$\theta^* = \frac{1}{ch} \sum_{i=1}^k \theta_i^*$$

где; k – общее количество измеренных значений в одном измерении: $k = ch \cdot V$ (V – объем выборки на каждый канал);

б) если $E_{г} > E_{гд}$, то можно считать, что один из каналов отличается, но нельзя считать его отказавшим, так как существует вероятность ошибки второго рода. Однако, исходя из мажоритарного принципа, значение измеряемой величины должно вы-

числяться по формуле: $\theta^* = \frac{1}{ch_p} \sum_{i=1}^{k_p} \theta_i^*$, где k_p –

количество измеренных значений в одном измерении от нескольких каналов, расхождение между которыми согласно критерию Манна–Уитни является незначимым (вычисляется аналогично k); ch_p – количество каналов, расхождение между которыми незначимо;

в) если $E_{г} > E_{гд}$ во всех каналах модели (строка 4 в табл. 2), то в большинстве случаев можно считать, что произошел полный отказ измерительного модуля [12, 13].

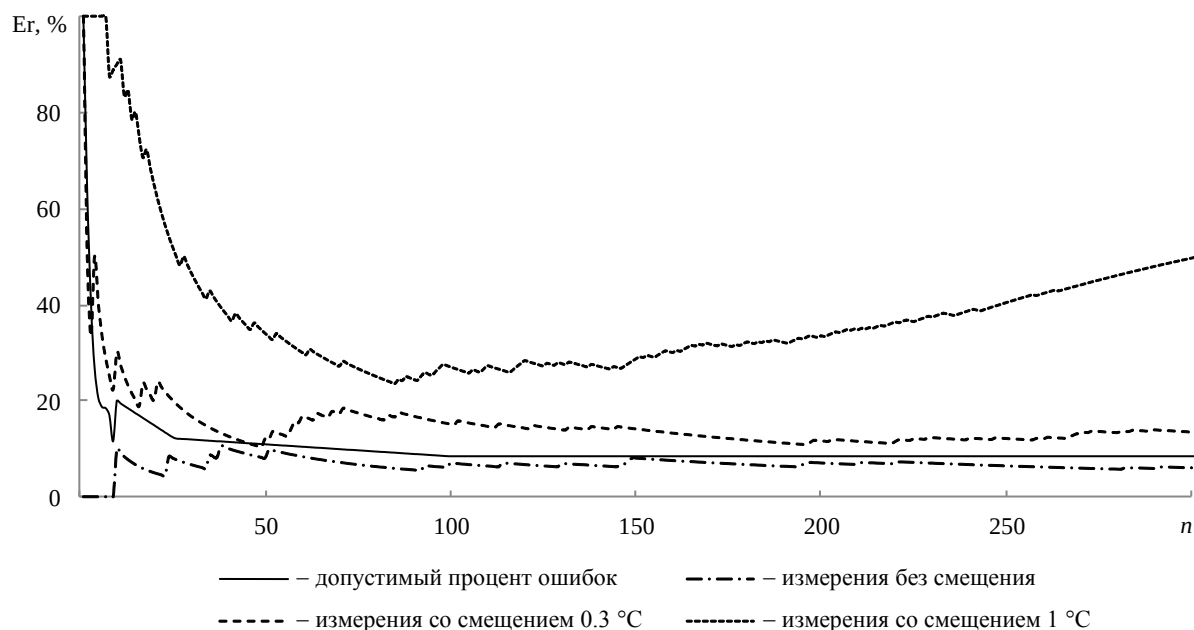


Рис. 4. График зависимости процента ошибок от количества измерений в одном модуле
Fig. 4. Graph of the percentage of errors depending on the number of measurements in one module

Таблица 3. Возможные ситуации в работе модуля
Table 3. Possible situations in the module operation

№	Допустимый процент ошибки	Возможные ситуации
1	$E_g \leq E_{гд}$	Модуль полностью работоспособен, и значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений всех каналов
2	$E_g > E_{гд}$ в одном из каналов	Один из каналов отличается по проценту ошибки, и поэтому значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений двух других каналов
3	$E_g > E_{гд}$ в двух каналах	Если в двух каналах превышен допустимый процент ошибки и при этом выполняется п. 2 (согласно п. 2 один из каналов был исключен), то вторым исключаемым каналом следует считать тот, у которого расхождение с первым отличающимся каналом незначимо. Таким образом, значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений оставшегося канала
4	$E_g > E_{гд}$ во всех каналах	Модуль является полностью отказавшим, и значение измеряемой величины недопустимо
5	Если выполнены пп. 2 и 3 данной таблицы, после чего отказы перестали выявляться (отказ трех каналов)	

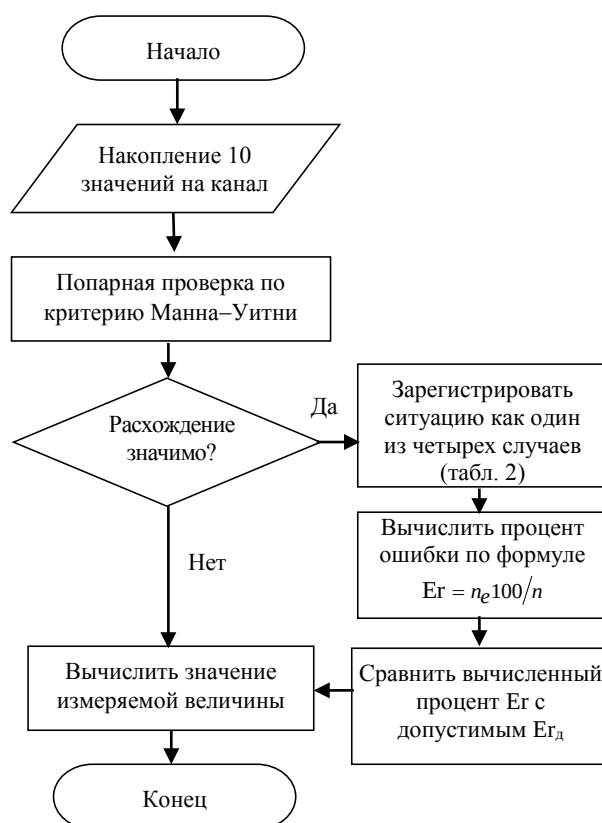


Рис. 5. Алгоритм выявления отказов каналов в модуле
Fig. 5. Algorithm of channel failure detection in module

Результаты. При анализе результатов работы модели измерительного модуля с избыточной структурой была получена таблица возможных ситуаций при попарной проверке по критерию Манна–Уитни, а также система уравнений, позволяющая вычислить допустимый процент ошибки, что дает возможность выявить отличающийся канал и далее сформулировать возможные ситуации в работе модуля (табл. 3).

Выводы. Разработан алгоритм (рис. 5), предназначенный для выявления отказов каналов и анализа результатов, характеризующих вид отка-

за. Рассмотрены возможности использования непараметрических ранговых критериев для работы с выборками малого объема, а также диагностические ситуации, позволяющие принимать статистически обоснованное решение о состоянии измерительного модуля. В перспективе планируется использовать данный метод при диагностическом контроле исправности оборудования технологических процессов, связанных с сжиганием топлива, а именно в котельных установках и установках термического уничтожения отходов.

Список литературы

1. Иыуду К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. М.: Высш. шк., 1989. С. 216.
2. Кутдусов Ф. Х., Рублев Т. А. Адаптивный мажоритарный элемент в системах автоматического управления. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-mazhoritarnyy-element-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения 10.12.2019)
3. Определение отказа, классификация отказов. URL: <https://helpiks.org/1-24348.html> (дата обращения 12.12.2019)
4. Lorcak P. R., Caglayan A.K., Eckhardt D. E. A Theoretical Investigation of Generalized Voters for Redundant Systems // Proc. 19th FTCS. Chicago, Illinois, June 1989. P. 444–451.
5. Стариченко Б. Е. Обработка и представление данных педагогических исследований с помощью компьютера. Екатеринбург: Изд-во Урал. ГУ, 2004. С. 218.
6. Королев П. Г. Анализ развития дефектов железнодорожного полотна // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2018. № 9. С. 93–98.
7. Оценка дефектов железнодорожного полотна. Исследование критерия / П. Г. Королев, В. А. Костыря, С. А. Кук, О. А. Микус // XXI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2018. СПб., 23–25 мая 2018 г. С. 85–88.
8. Экспериментальные исследования системы динамического мониторинга рельсового пути / П. Г. Королев, Д. Ю. Ларионов, М. Т. Рузиева, М. Н. Шилов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 10. С. 50–54.
9. Лемешко Б. Ю. Проверка гипотез о математических ожиданиях и дисперсиях в задачах метрологии и контроля качества при вероятностных законах, отличающихся от нормального // Метрология. 2004. № 3. С. 3–15.
10. Алексеев В. В., Королев П. Г., Утушкина А. В. Верификация контрольно-измерительных материалов и проверка знаний студентов // Вестн. ТГТУ. 2013. Т. 19, № 4. С. 890–896.
11. Siegel S., Tukey J. W. A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in unpaired samples // J. Amer. Statist. Assoc. 1960. Vol. 55. P. 429–455.
12. Инерциальная система MEMS-Based для диагностики железнодорожного пути / А. М. Боронахин, Л. Н. Подгорная, Е. Д. Бокхман, Н. С. Филипеня, Ю. В. Филатов, Р. Б. Шалимов, Д. Ю. Ларионов // Гироскопия и навигация. 2011. Т. 2, № 4. С. 261–268.
13. Алгоритм идентификации диагностических признаков по параметрам вибрации компрессорной установки / В. В. Алексеев, П. Г. Королев, В. С. Конова, И. В. Калякин, А. Г. Перкова // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 2. С. 162–167.

Информация об авторе

Минчев Никадим Викторович – инженер-метролог АО «НПФ "УРАН-СПб"», аспирант 3-го года обучения кафедры информационно-измерительных систем и технологий факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сферы научных интересов: метрология, программируемые логические контроллеры и их применение в автоматизации технологических процессов, приборостроение.

Адрес: Акционерное общество «Научно-производственная фирма "УРАН-СПб"», ул. Варшавская, д. 5А, лит. Л, оф. 105, Санкт-Петербург, 196128, Россия
E-mail: minivik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9825-8178>

References

1. Iyudu K. A. Reliability, control and diagnostics of computing machines and systems. M., Higher School of Economics, 1989, p. 216. (In Russ.)
2. Kutdusov F. Kh., Rublev T. A. *Adaptivnyi mazhoritarnyi element v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-mazhoritarnyy-element-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (accessed 10.12.2019) (In Russ.)
3. *Opredelenie otkaza, klassifikacija otkazov*. Available at: <https://helpiks.org/1-24348.html> (accessed 12.12.2019) (In Russ.)
4. Lorzak P. R., Caglayan A. K., Eckhardt D. E. A Theoretical Investigation of Generalized Voters for Redundant Systems. Proc. 19th FTCS, Chicago, Illinois, June 1989, pp. 444–451.
5. Starichenko B. E. *Obrabotka i predstavlenie dannykh pedagogicheskikh issledovaniy s pomoshch'yu komp'yutera* [Processing and presentation of pedagogical research data using a computer]. Ekaterinburg, Ural. GU, 2004, p. 214. (In Russ.)
6. Korolev P. G. Analysis of the development of railway track defects. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2018, no. 9, pp. 93–98. (In Russ.)
7. Korolev P. G., Kostyrya V. A., Kuk S. A., Mikus O. A. Railroad track damages assessment. Test research. *XXI Mezhdunar. conf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. SCM'2018. SPb*, 23–25 may 2018. pp. 85–88.
8. Korolev P. G., Larionov D. Yu., Rzieva M. T., Shilov M. N. Experimental studies of the dynamic track monitoring system. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2014, no. 10, pp. 50–54. (In Russ.)
9. Lemesheko B. Yu. Testing hypotheses about mathematical expectations and variances in problems of Metrology and quality control under probabilistic laws that differ from the normal one. *Metrologiya* [Metrology]. 2004, no. 3, pp. 3–15. (In Russ.)
10. Alekseev V. V., Korolev P. G., Utushkina A. V. Test materials verification and students' examination. *Vest. TGTU*. [Bulletin of TSTU.]. 2013, vol. 19, no. 4, pp. 890–896. (In Russ.)
11. Siegel S. A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in unpaired samples. *J. Amer. Statist. Assoc.* 1960, vol. 55, pp. 429–455.
12. Boronakhin A. M., Podgornaya L. N., Bokkhaman E. D., Filipenya N. S., Filatov Yu. V., Shalimov R. B., Larionov D. Yu. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics. *SPb, Girokopiya i Navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2011, vol. 2, no. 4, pp. 261–268. (In Russ.)
13. Alekseev V. V., Korolev P. G., Konovalova V. S., Kalyakin I. V., Perkova A. G. Diagnostic features identification algorithm according to vibration parameters of a compressor installation. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2015, vol. 2, pp. 162–167. (In Russ.)

Information about the author

Nikadim V. Minchev, metrologist engineer Joint-stock company research and Production Company "URAN-SPb", 3-year post-graduate student of the Department of information and measurement systems and technologies of the faculty of information and measurement and biotechnical systems of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: metrology, programmable logic controllers and their application in process automation, instrument engineering.
Address: Joint Stock Company Scientific and Production Company "URAN-SPb", off. 105, 5A/L Varshavskaya St., St Petersburg 196128, Russia
E-mail: minivik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9825-8178>

ПАМЯТИ ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВИЧА КУЛЕШОВА



Профессор В. Н. Кулешов
(16.07.1937–22.12.2020)

22 декабря 2020 г. ушел из жизни известный ученый и педагог профессор Валентин Николаевич Кулешов, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования, доктор технических наук.

Валентин Николаевич родился 16 июля 1937 г. Школьные годы завершил с золотой медалью и в 1954 г. поступил в Московский энергетический институт на новую специальность "Радиофизика и электроника", созданную по инициативе академика В. А. Котельникова. Успешную учебу гармонично сочетал с перспективными научными исследованиями на кафедре радиопередающих устройств под руководством выдающегося ученого и педагога профессора С. И. Евтянова и с регулярными и результативными поединками в секции единоборств МЭИ под руководством основоположника самбо А. А. Харлампиева. Боевой спортивный настрой, упорство в достижении весомых результатов стали неотъемлемыми в его творческой биографии. Он еще студентом 4-го курса в соавторстве с профессором С. И. Евтяновым опубликовал в ведущем журнале "Научные доклады высшей школы. Радиотехника и электро-

ника" статью об исследовании флуктуаций в источниках колебаний с прецизионной стабильностью частоты. В дальнейшем этот научный задел получил развитие в его монографии "Шумы в полупроводниковых устройствах", которая до сих пор по своему содержанию является уникальной, изданной в 1977 г. в СССР, а затем в Чехословакии. После получения диплома о высшем образовании в 1960 г. он сразу был принят на должность ассистента кафедры, где до конца своей жизни увлеченно и плодотворно трудился, пройдя все ступени профессионального научного и педагогического роста.

Валентин Николаевич не только один из наиболее успешных учеников профессора С. И. Евтянова, но и достойный преемник своего Учителя, продолжатель традиций его научно-образовательной школы. Под его руководством были выполнены многочисленные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в том числе по перспективной тематике исследований управляемых по частоте источников колебаний диапазона крайне высоких частот. За работы в области систем фазовой синхронизации ему в составе научного коллектива присуждена Государственная премия СССР; за работы в области космической радиоэлектроники он награжден медалью ордена "За заслуги перед Отечеством" II степени, за большой личный вклад в развитие отечественной науки ему присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки РФ". За годы научно-педагогической деятельности им опубликовано 250 научных работ и 18 учебных изданий, в том числе учебники, рекомендованные Федеральным учебно-методическим объединением РФ для вузов страны. Под его руководством защищены 16 кандидатских и 2 докторские диссертации по техническим наукам. Его учебники успешно преподают в вузах нашей страны и за рубежом.

Профессор В. Н. Кулешов глубоко разбирался и в оптических системах локации, и в вопросах повышения скорости передачи информации в линиях связи с использованием сигналов с взаимной интерференцией символов, и в теории динамического хаоса в нелинейных системах для создания новых сигнальных конструкций, обеспечиваю-

щих работу защищенных от несанкционированного доступа к информации каналов связи, и в методах создания маломощных миниатюрных управляемых по частоте генераторов и устройств формирования колебаний. Его знания и практический опыт были широко востребованы на кафедре и далеко за ее пределами при его участии в научных и научно-образовательных мероприятиях в нашей стране и за рубежом, в его работе в редакционных советах ведущих научных журналов, в диссертационных советах и в экспертной деятельности.

Валентин Николаевич более 20 последних лет был главой московского отделения международного общества "Институт инженеров электротехники и электроники" (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) по электронным цепям и системам и в этом качестве возглавлял программные и организационные комитеты международных научных конференций, был научным руководителем секций по устройствам генерирования и формирования сигналов. Он также известен как бессменный организатор всесоюзных школ-семинаров по стабилизации частоты, международных симпозиумов по акустоэлектронике, управлению частотой и формированию сигналов.

С 1990 г. профессор В. Н. Кулешов активно работал в Учебно-методическом совете, входящем в состав Федерального учебно-методического объединения России по направлению "Радиотехника". Он являлся одним из основных разработчиков трех образовательных стандартов первого поколения (1992–1993) и двух образовательных стандартов второго поколения (1999). За научно-методические работы в области дистанционного образования ему в составе авторского коллектива в 2002 г. была присуждена премия Президента РФ в области образования. В. Н. Кулешов в течение 17 лет был членом редсовета научного журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника".

Кончина профессора В. Н. Кулешова – огромная потеря не только для Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова НИУ "МЭИ", но и для всей научно-педагогической общественности страны.

Память о Валентине Николаевиче Кулешове, крупном ученом с широчайшим кругозором, талантливым педагоге, умелом организаторе и замечательном человеке, навсегда сохранится в наших сердцах.

Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова и кафедра формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:
 - УДК (выравнивание по левому краю);
 - название статьи;
 - авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
 - место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
 - ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
 - источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
 - благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
 - конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).
- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);

- авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
 - Приложения (при наличии).
 - Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
 - Список литературы (библиографический список);
 - Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см; колонтитулы – верхний 2 см, нижний 2 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта 10.5 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников:

- 05.12.00 – "Радиотехника и связь" (05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 Радиолокация и радионавигация);
- 05.27.00 – "Электроника" (05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.03 – Квантовая электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники);
- 05.11.00 – "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" в редакции приказа ВАК от 10.01.2012 № 5 (05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений, 05.11.03 – Приборы навигации, 05.11.06 – Акустические приборы и системы, 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы, 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы, 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, 05.11.14 – Технология приборостроения, 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение, 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям), 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.11.18 – Приборы и методы преобразования изображений и звука).

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 24 № 1 2021

Vol. 24 No. 1 2021

Научный редактор А. М. Мончак
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка И. О. Буяновой

Science Editor A. M. Monchak
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional I. O. Buyanova

Подписано в печать 26.02.21. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 9,88. Печ. л. 9,5. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 12.

Signed to print 26.02.21. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 9,88. Printed sheets 9,5. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 12.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ETU Publishing house
5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, Russia