



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 23 № 4 2020



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 23 No. 4 2020

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2020

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

Б. А. КАЛИНИКОС, д.ф.-м.н., проф.,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

Alexei KANAREYKIN, Dr. Sci., гл. исполн. директор, Euclid TechLabs LLC, 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;
- привлечь 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

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

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EXECUTIVE SECRETARY

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

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Оригинальные статьи

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Фролов Д. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н., Сотсков В. А. Динамические характеристики бигармонического автогенератора6

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS15

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Маврычев Е. А., Приблудова Е. Н., Сидоров С. Б. Спектральная эффективность беспроводной релейной сети в частотно-неселективном канале.....25

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

Kosarev A., Cosme I., Mansurova S., Andronikov D., Abramov A., Shakhray I., Terukov Eu. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Materials and Organic Semiconductors in Photovoltaic Devices38

Радиофотоника

Таценко И. Ю., Легкова Т. К., Иванов А. В., Устинов А. Б. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну.....48

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

Глеб К. А. Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных бுவ традиционной формы57

Мякинин О. О. Сравнение алгоритмов для шумоподавления изображений оптической когерентной томографии меланомы кожи.....66

Дунаев А. В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики.....77

Правила для авторов статей92

CONTENTS

Original articles

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

Frolov D. A., Safin A. R., Udalov N. N., Sotskov V. A. Dynamic Characteristics of a Biharmonic Self-Oscillator.....6

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS.....15

Systems, Networks and Telecommunication Devices

Mavrychev E. A., Pribludova E. N., Sidorov S. B. Spectral Efficiency of Wireless Relay Network in Frequency Non-Selective Channel.....25

Quantum, Solid-state, Plasma and Vacuum Electronics

Kosarev A., Cosme I., Mansurova S., Andronikov D., Abramov A., Shakhray I., Terukov Eu. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Materials and Organic Semiconductors in Photovoltaic Devices.....38

Microwave Photonics

Tatsenko I. Yu., Legkova T. K., Ivanov A. V., Ustinov A. B. Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber.....48

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

Gleb K. A. Method for Determining the Sea Waves Curvature Using Wave Buoys Conventional Shape.....57

Myakinin O. O. Comparison of Noise Reduction Algorithms for Optical Coherence Tomography Images of Skin Melanoma.....66

Dunaev A. V. A Method and a Device for Evaluating the Functional State of Microcirculatory-Tissue Systems of the Human Body Based on Multiparametric Optical Diagnostics.....77

Author's Guide.....92

Динамические характеристики бигармонического автогенератора

Д. А. Фролов¹, А. Р. Сафин^{1, 2✉}, Н. Н. Удалов¹, В. А. Сотсков³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт общей физики им. А. М. Прохорова" Российской академии наук, Москва, Россия

✉arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. Современные методы стабилизации частоты автоколебаний базируются на улучшении стабильности реактивных параметров схемы автогенератора и повышении добротности колебательной системы. Существует также возможность улучшения стабилизации частоты, основанная на явлении взаимной синхронизации мод автогенератора при использовании многоконтурной колебательной системы. Ранее был описан метод снижения фазового шума с синхронизацией двух мод в бигармоническом автогенераторе с кратными частотами, разработанный в предположении безынерционности активного элемента. Идея метода синхронизации основного колебания с его второй гармоникой с помощью дополнительного контура основана на соображении, что внутренние флуктуационные процессы в активном элементе синфазно модулируют все гармоники тока. Это позволяет использовать "естественную" взаимную корреляцию шумовых процессов с целью нейтрализации их влияния.

Цель работы. Построение и анализ математической модели бигармонического автогенератора с целью анализа режимов его работы и уменьшения фазового шума выходного колебания.

Материалы и методы. Математическая модель получена методом медленно меняющихся амплитуд, а анализ выполнен методами численного интегрирования и дифференцирования.

Результаты. В статье проведен анализ динамических режимов бигармонического трехточечного автогенератора, работающего в режиме фазовой синхронизации двух мод. Показано, что с ростом инерционности активного элемента синхронный режим сохраняется. Получены укороченные дифференциальные уравнения системы для медленно меняющихся амплитуд и фаз колебательных мод. Исследование нелинейной динамики и стационарного синхронного режима системы проведено методом фазового пространства в координатах "амплитуды мод – разность фаз".

Заключение. Натурный эксперимент и теоретические исследования позволяют сделать вывод о возможности уменьшения фазового шума в стационарном синхронном двухмодовом режиме, что может быть использовано для стабилизации частоты автогенераторов различной физической природы. Механизм преобразования фазовых и амплитудных колебаний в режиме синхронизации представляет значительный интерес с фундаментальной точки зрения не только для анализа флуктуаций, но и для преобразования модулированных колебаний в нелинейных избирательных устройствах.

Ключевые слова: бигармонический автогенератор, динамические процессы, фазовое пространство, фазовый шум

Для цитирования: Динамические характеристики бигармонического автогенератора / Д. А. Фролов, А. Р. Сафин, Н. Н. Удалов, В. А. Сотсков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-6-14

Источники финансирования. Грант Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-283.2019.8, грант РФФИ № 19-29-03015, грант Минобрнауки России № 075-15-2019-1947.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.06.2020; принята к публикации после рецензирования 30.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



Dynamic Characteristics of a Biharmonic Self-Oscillator

Daniil A. Frolov¹, Ansar R. Safin^{1,2✉}, Nikolay N. Udalov¹, Valery A. Sotskov³

¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia

²Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern methods of stabilizing a frequency of self-oscillations use an improvement of the stability of reactive parameters of the self-oscillators circuit and an increase in the quality factor of an oscillating system. It is also possible to improve the frequency stabilization based on the phenomenon of mutual synchronization of the self-oscillator modes using a multi-loop oscillation system. Previously, a method for reducing a phase noise of an auto-oscillator with synchronization of two modes in a biharmonic auto-oscillator with multiple frequencies was described. The method was developed under the assumption that an active element is inertialess. The idea of the method of synchronizing of the main oscillation with its 2-nd harmonic using an additional loop is based on the consideration that internal fluctuation processes in the active element modulate in-phase all current harmonics. Therefore, it is possible to use this "natural" cross-correlation of noise processes to neutralize their influence.

Aim. Building and analysis of a mathematical model of a biharmonic oscillator in order to analyze the operating modes of such generator and reduction of the phase noise of its output oscillation.

Materials and methods. The mathematical model was developed by the method of slowly changing amplitudes, and the analysis was performed by methods of numerical integration and differentiation.

Results. It was demonstrated that synchronization of two oscillations at multiple frequencies in the active element reduced the phase noise of the main oscillation.

Conclusion. In the paper dynamic modes of a biharmonic Colpitts oscillator operating in the phase synchronization mode of two waves were analyzed. It was shown that with an increase in an inertia of the active element, the synchronous mode was preserved. Shortened differential equations of the system for slowly changing amplitudes and phases of oscillatory modes were obtained. The study of nonlinear dynamics and of stationary synchronous mode of the system was carried out by the method of phase space in coordinates of "mode amplitude – phase difference". The conducted field experiment allows one to conclude that it is possible to reduce the phase noise in a stationary synchronous biharmonic mode. It can be used in the frequency stabilization task.

Keywords: biharmonic self-oscillator, dynamic processes, phase space, phase noise

For citation: Frolov D. A., Safin A. R., Udalov N. N., Sotskov V. A. Dynamic Characteristics of a Biharmonic Self-Oscillator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-6-14

Financial support. Presidential grant for young scientists no. MK-283.2019.8, RFBR grant no. 19-29-03015, Ministry of Education and Science of Russia grant no. 075-15-2019-1947.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 23.06.2020; accepted 30.07.2020; published online 29.09.2020

Введение. Традиционные методы стабилизации частоты автоколебаний базируются на двух основных подходах: улучшении стабильности реактивных параметров схемы автогенератора [1] и повышении добротности колебательной системы [2–5]. Однако возможен другой путь, основан-

ный на явлении взаимной синхронизации мод. Так, в [6] описан метод снижения фазового шума (ФШ) на основе синхронизации двух мод в бигармоническом автогенераторе (БАГ) с кратными частотами [7], разработанный в предположении безынерционности активного элемента (АЭ).

Идея метода синхронизации основного колебания с его второй гармоникой с помощью дополнительного контура [6] основана на соображении, что внутренние флуктуационные процессы в АЭ синфазно модулируют все гармоники тока. Это позволяет использовать "естественную" взаимную корреляцию шумовых процессов с целью нейтрализации их влияния.

Экспериментально показано [8], что для БАГ на диодах Ганна наблюдается уменьшение ФШ. В [9], [10] исследована схема синхронизации двух наноразмерных спинтронных автогенераторов, для которых продемонстрирована также возможность снижения ФШ в режиме фазовой синхронизации. В связи с этим механизм преобразования фазовых и амплитудных шумов при синхронизации автоколебаний представляет значительный интерес с фундаментальной точки зрения для автогенераторов различной физической природы.

На рис. 1 показан пример схемы двухконтурного автогенератора (АГ). Инерционный АЭ представлен последовательным соединением безынерционного элемента с вольт-амперной характеристикой $i(u)$ и линии задержки на длительность τ_d . Указанная задержка вводится АЭ в гармоники выходного тока. Колебательная система представлена резонансными контурами с эквивалентными индуктивностями L_k , емкостями C_k и сопротивлениями R_k ($k = 1, 2$).

Типичная кривая затягивания, обеспечивающая стабилизацию частоты (рис. 2), показывает зависимость частот связи колебаний ω_k относительно парциальных резонансных частот контуров ω_{0k} в бигармоническом режиме АГ. Если допустить, что флуктуации выходной емкости АЭ приведут к увеличению частоты первого колебания

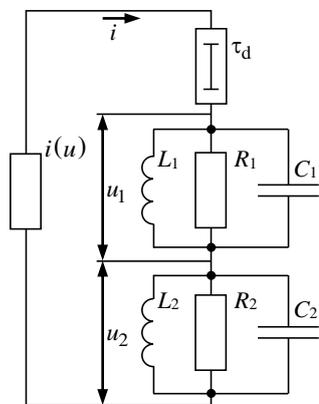


Рис. 1. Эквивалентная схема бигармонического автогенератора

Fig. 1. Equivalent circuit of a biharmonic self-oscillator

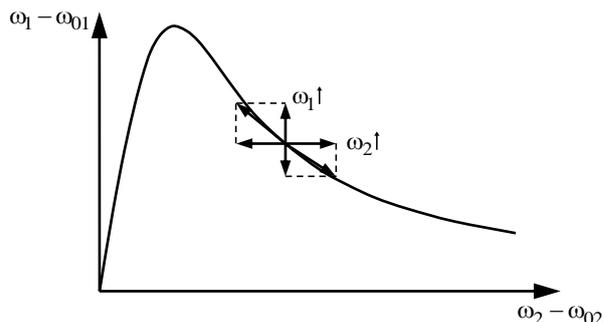


Рис. 2. Кривая затягивания частот бигармонического автогенератора

Fig. 2. Pulling curve of the biharmonic oscillator frequencies

($\omega_1 \uparrow$), то это вызовет смещение рабочей точки по направлению уменьшения частоты второго колебания. Напротив, изменение емкости, приводящее к увеличению частоты второго колебания ($\omega_2 \uparrow$), вызывает снижение частоты первого колебания. Таким образом, возникающие в системе эффекты изменяют частоты колебаний в противоположные стороны, что приводит к дополнительной стабилизации частот.

При работе генератора на частоте, близкой к граничной частоте транзистора, последний проявляет инерционные свойства. Этот эффект приводит к ухудшению условий самовозбуждения колебаний, однако в литературе нет анализа БАГ с инерционным АЭ.

Расчеты характеристик типичного СВЧ-транзистора [11] показали возможность упрощенного описания такого АЭ в виде нелинейного звена и последующей линии задержки, где, в первом приближении, запаздывание выходного тока прямо пропорционально номеру гармоники.

В настоящей статье представлены результаты анализа динамических процессов БАГ и приведены результаты натурального эксперимента с БАГ на транзисторе ММВТ3904 [12], который подтвердил эффект уменьшения ФШ в синхронном двухмодовом режиме.

Математическая модель. Опишем вольт-амперную характеристику АЭ на рис. 1 полиномом третьей степени [7], [13]:

$$i(u) = c_1 u + c_2 u^2 - c_3 u^3, \quad (1)$$

где коэффициенты $c_1, c_3 > 0$, а c_2 – любого знака.

Коэффициент передачи линии задержки имеет вид

$$Z_d(j\omega) = \exp(-j\omega\tau_d). \quad (2)$$

Известно [11], что время задержки для каждой гармоники зависит от ее номера и мало меняется при малых отстройках от рассматриваемых частот. Тогда для основной частоты $j\omega_{01}\tau_{d1} = j\tau$, а для второй частоты в синхронном режиме $j\omega_{02}\tau_{d2} = j2\tau$.

Предположим, что выходной сигнал БАГ имеет вид

$$u = u_1 + u_2 = U_1 \cos(\varphi_1) + U_2 \cos(\varphi_2), \quad (3)$$

где U_k , φ_k – амплитуды и фазы колебаний k -й моды, причем в синхронном режиме $\varphi_2 = 2\varphi_1 + \Delta\varphi$, а $\Delta\varphi$ – обобщенная разность фаз, которая в синхронном режиме является постоянной во времени величиной.

Укороченные коэффициенты передачи резонансных контуров имеют вид [14]:

$$\begin{aligned} Z_1(q) &= R_1 / (1 + qT_1); \\ Z_2(q) &= R_2 / [1 + (j\Delta\omega + q)T_2], \end{aligned} \quad (4)$$

где R_k – резонансные сопротивления контуров; $q = d/dt$ – оператор дифференцирования; $T_k = 2Q_k / \omega_{0k}$ – постоянные времени контуров; $\Delta\omega$ – расстройка второго контура относительно первого, причем Q_k – добротности контуров.

Система укороченных дифференциальных уравнений [14] с учетом (1)–(4) примет вид

$$\begin{cases} \frac{T_1}{U_1} \frac{dU_1}{dt} = R_1 [S_{a1} \cos(\tau) - S_{p1} \sin(\tau)] - 1; \\ \frac{T_2}{U_2} \frac{dU_2}{dt} = R_2 [S_{a2} \cos(\tau) - S_{p2} \sin(\tau)] - 1; \\ T_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = -R_1 [S_{p1} \cos(\tau) + S_{a1} \sin(\tau)]; \\ T_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = -R_2 [S_{p2} \cos(2\tau) + S_{a2} \sin(2\tau)] - \Delta\omega T_2, \end{cases} \quad (5)$$

где $S_{a1,2}$, $S_{p1,2}$ – средние значения крутизны.

Для получения выражений указанных средних значений $S_{a1,2}$, $S_{p1,2}$ подставим (3) в (1) и выделим множители при $\cos(\varphi_i)$ и $\sin(\varphi_i)$:

$$\begin{aligned} S_{a1} &= c_1 [1 - x_1^2 - 2x_2^2 + x_2 b \cos(\Delta\varphi)]; \\ S_{p1} &= -c_1 x_2 b \sin(\Delta\varphi); \\ S_{a2} &= c_1 \left[1 - x_2^2 - 2x_1^2 + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \cos(\Delta\varphi) \right]; \\ S_{p2} &= c_1 \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \sin(\Delta\varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где $x_k = U_k / U_m$ – нормированные амплитуды колебаний; $b = 4/\sqrt{k} = \sqrt{4c_2^2 / (3c_1c_3)}$, $k = \sqrt{12c_1c_2 / c_3^2}$ – коэффициенты, определяющие характеристику АЭ, причем $U_m = \sqrt{4c_1 / (3c_3)}$ – амплитуда колебания в одночастотном режиме.

Тогда, подставив (6) в (5), получим систему укороченных уравнений для описания БАГ с учетом того, что в синхронном режиме $\varphi_2 = 2\varphi_1 + \Delta\varphi$:

$$\begin{cases} \frac{T_1}{x_1} \frac{dx_1}{dt} = c_1 R_1 \left[(1 - x_1^2 - 2x_2^2) \cos(\tau) + x_2 b \cos(\tau - \Delta\varphi) \right] - 1; \\ \frac{T_2}{x_2} \frac{dx_2}{dt} = c_1 R_2 \left[(1 - x_2^2 - 2x_1^2) \cos(2\tau) + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \cos(2\tau + \Delta\varphi) \right] - 1; \\ \frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = 2 \frac{c_1 R_1}{T_1} \left[(1 - x_1^2 - 2x_2^2) \sin(\tau) + x_2 b \sin(\tau - \Delta\varphi) \right] - \Delta\omega - \\ - \frac{c_1 R_2}{T_2} \left[(1 - x_2^2 - 2x_1^2) \sin(2\tau) + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \sin(2\tau + \Delta\varphi) \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Динамические характеристики БАГ. Фазовым пространством системы дифференциальных уравнений БАГ (7) с инерционным АЭ является трехмерное евклидово пространство \mathbb{R}^3 с координатами $(x_1, x_2, \Delta\varphi)$ [15]. Обобщенная разность фаз $\Delta\varphi$ представляет собой периодическую функцию. Фазовые траектории получены решением (7) в средах Octave/SciLab [16], [17] (рис. 3). На рисунке плоскость $(x_1, \Delta\varphi)$ расположена горизонтально, а ось x_2 – вертикально. При построении траекторий заданы факторы регенерации колебаний $c_1 R_1 = c_1 R_2 = 3$, добротности контуров $Q_1 = Q_2 = 200$, $f_1 = 10$ МГц, $T_1/T_2 = 2$ и характеристика АЭ $k = 13$ при расстройке контуров $\Delta\omega = 0$.

На рис. 3 представлены динамические процессы системы БАГ при отсутствии задержки в АЭ (рис. 3, а) и при наличии задержки (рис. 3, б). В фазовом пространстве существует один устойчивый режим – бигармонический (точка 1), для которого характерны ненулевые амплитуды сигналов двух колебаний ($x_1, x_2 > 0$) с точно кратными

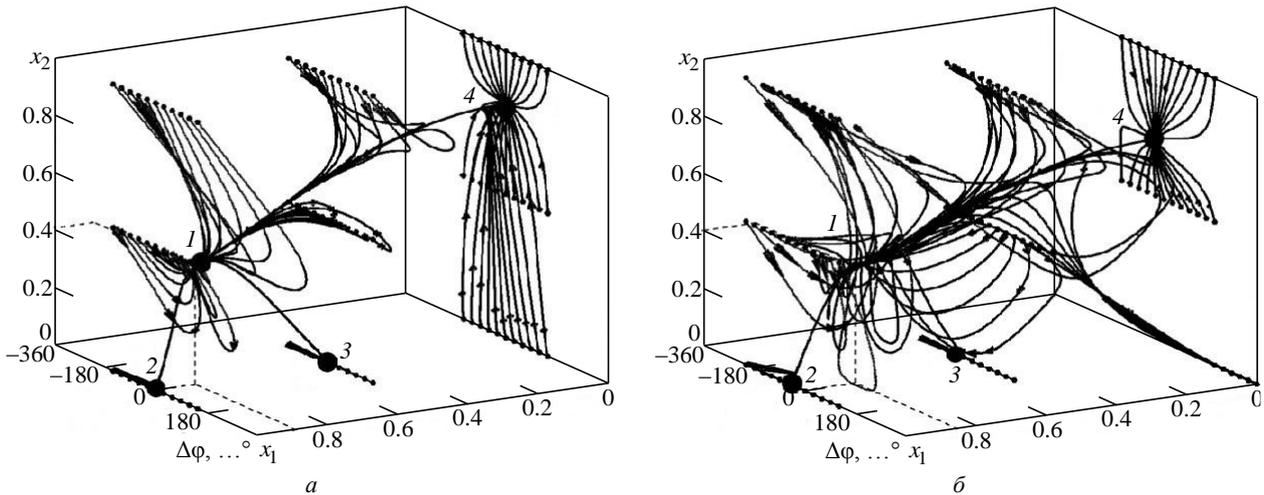


Рис. 3. Фазовый портрет при $\tau = 0$ (а) и $\tau = 25^\circ$ (б)

Fig. 3. Phase portrait for $\tau = 0$ (a) и $\tau = 25^\circ$ (б)

частотами. Точками 2–4 отмечены трехмерные особые точки типа "седло" [15].

При наличии задержки (рис. 3, б) седловая особая точка 4 приближается к особым точкам такого же типа 2 и 3, а устойчивый узел (рис. 3, а, точка 1) преобразуется в устойчивый узлофокус (рис. 3, б, точка 1).

Для наглядного представления динамики системы БАГ на рис. 4 показаны переходные про-

цессы x_1 , x_2 и $\Delta\varphi$ как функции времени t для некоторых начальных условий при двух значениях задержки. При отсутствии инерционности АЭ (рис. 4, а) переходные процессы при начальных условиях (НУ) 1 и 3 устанавливаются достаточно быстро, но при НУ 2 и 4 время переходного процесса увеличивается.

При наличии инерционности АЭ (рис. 4, б) возникают колебательные переходные процессы,

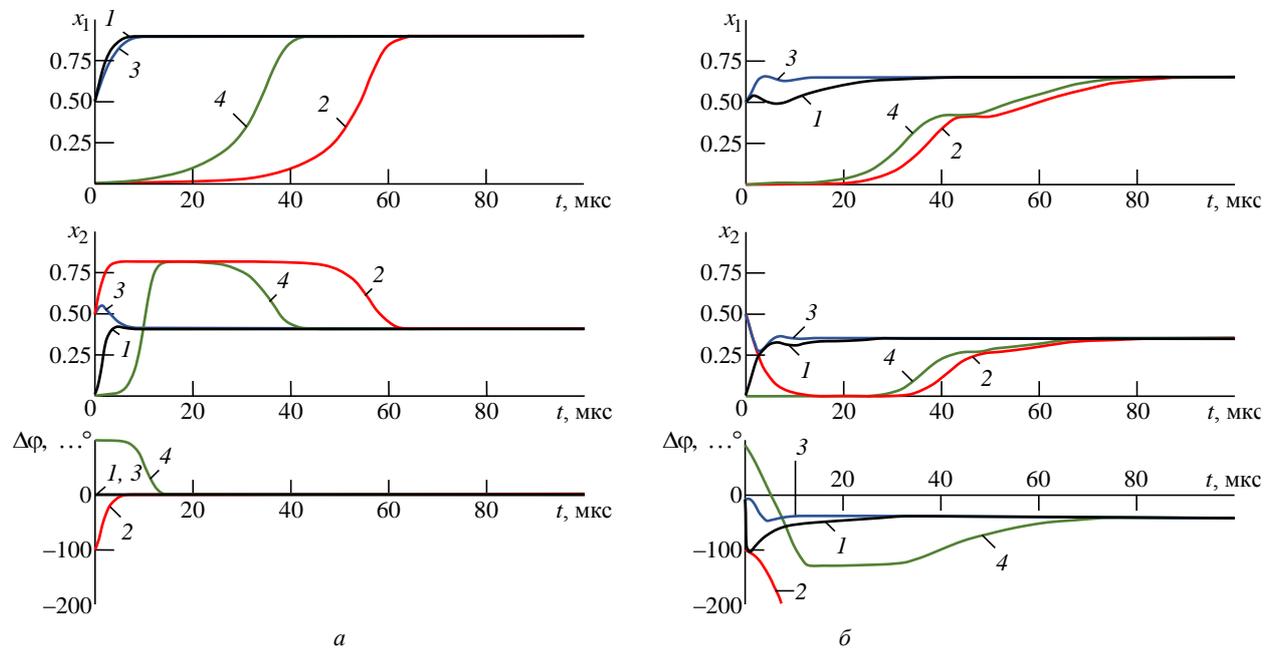


Рис. 4. Переходные процессы при $\tau = 0$ (а) и $\tau = 30^\circ$ (б) для различных начальных условий:

1 – $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0.001$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 2 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 3 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = -90^\circ$;
 4 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 0.5$; $\Delta\varphi_0 = -300^\circ$

Fig. 4. Transient processes at $\tau = 0$ (a) and $\tau = 30^\circ$ (б) for different initial conditions:

1 – $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0.001$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 2 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 3 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = -90^\circ$;
 4 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 0.5$; $\Delta\varphi_0 = -300^\circ$

что является признаком устойчивого узлофокуса (см. рис. 3, б), а длительности переходных процессов увеличиваются. В частности, переходный процесс, представленный кривой 2 на рис. 4, б, столь продолжителен, что не приходит к установившемуся значению за время моделирования.

Из рис. 4 следует, что на начальном участке существует качественное изменение в переходном процессе второго колебания: в зависимости от значения амплитуды первого колебания его продолжительность может затянуться во времени. Это связано с тем, что при увеличении амплитуды первого колебания возрастает средняя крутизна, что приводит к росту запаса по самовозбуждению для второго колебания, а оно в свою очередь уменьшает среднюю крутизну второго колебания. В результате время переходного процесса, где колебания изменяются, увеличивается с ростом задержки АЭ.

Таким образом, при наличии задержки АЭ в системе существует устойчивый узлофокус с ненулевыми амплитудами (рис. 3, б, точка 1), т. е. существует устойчивый синхронный бигармонический режим.

Результаты эксперимента. Натурный эксперимент проводился с использованием n - p - n -транзистора ММВТ3904 [12]. На рис. 5 представлены спектральные плотности мощности ФШ моногармонического 1 и бигармонического 2 режимов в диапазоне отстрой от 10 Гц до 1 МГц. Измерение проводилось на измерителе ФШ Anariso PNA 26.5 GHz. Видно, что работа в бигармоническом режиме уменьшает ФШ в среднем на 9 дБн/Гц. На отстрой-

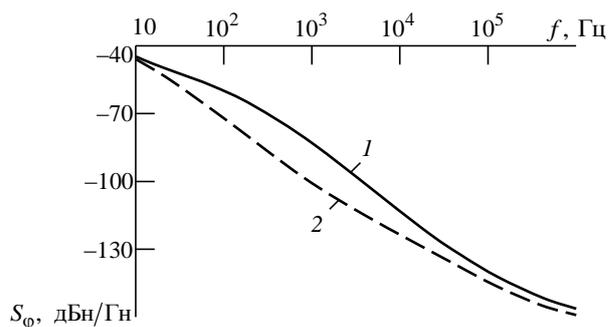


Рис. 5. Спектральная плотность мощности фазовых шумов бигармонического автогенератора в моногармоническом (1) и бигармоническом (2) режимах

Fig. 5. Power spectral density of the phase noise of the biharmonic oscillator in monoharmonic (1) and biharmonic (2) modes

ках около 0.5 кГц выигрыш по ФШ достигает 20 дБн/Гц. Таким образом, эксперимент подтверждает возможность существования синхронного бигармонического режима БАГ и уменьшения ФШ колебаний.

Заключение. В статье приводится анализ динамических процессов системы бигармонического автогенератора. Доказано существование устойчивого бигармонического режима двух колебаний с кратными частотами и ненулевыми амплитудами. При наличии задержки в БАГ из-за инерционности АЭ также показана возможность существования такого режима. Экспериментально показано, что бигармонический режим позволяет уменьшить фазовый шум основного колебания до 20 дБн/Гц.

Работа посвящается светлой памяти доктора технических наук Дмитрия Петровича Царапкина.

Авторский вклад

Фролов Даниил Андреевич – вывод, анализ и решение системы дифференциальных уравнений и их программирование. Подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – анализ фазовых портретов и переходных процессов. Подготовка текста статьи.

Удалов Николай Николаевич – руководство работой, анализ фазовых портретов и переходных процессов. Подготовка текста статьи.

Сотсков Валерий Анатольевич – анализ решения системы дифференциальных уравнений. Подготовка текста статьи.

Author's contribution

Daniil A. Frolov, obtaining, analysis and solving of the system of differential equations and their programming. Preparation of the article text.

Ansar R. Safin, analysis of the phase portraits and transients. Preparation of the article text.

Nikolay N. Udalov, supervision of the study, analysis of phase portraits and transients. Preparation of the article text.

Valery A. Sotskov, analysis of solution of the system of the differential equations. Preparation of the article text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nosal Z. M. Design of GaAs MMIC Transistors for the Low-Power Low Noise Applications // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., Boston, USA, 11–16 June 2000. Digest. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/MWSYM.2000.860872
2. Low Frequency Noise Temperature Measurements in SiGe:CHeterojunction Bipolar Transistors / M. Seif, F. Pascal, B. Sagnes, A. Hoffmann, S. Haendler, P. Chevalier, D. Gloria // Intern. Conf. on Noise and Fluctuations, Xian, China, 2–6 June 2015. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/ICNF.2015.7288603
3. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator // IEEE Magnetics Lett. 2015. Vol. 6. Art. 3500704. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
4. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, V. V. Lebedev, A. N. Petrov, A. V. Shamrai, B. A. Kalinikos // J. of Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1326. Art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
5. Recent Investigations on BAW Resonators at Cryogenic Temperatures / M. Goryachev, S. Galliou, J. Imbaud, R. Bourquin, B. Dulmet, P. Abbé // Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proc. San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/FCS.2011.5977293
6. Tsarapkin D. P., Chichvarin M. I., Isakov I. A. Experimental Verification of Compensation Phenomena in Oscillators with Two Multiple Modes // Proc. of the IEEE/EIA Intern. Frequency Control Symp. and Exhibition, Kansas City, USA, 7–9 June 2000. P. 463–470. doi: 10.1109/FREQ.2000.887401
7. Уткин Г. М. Автоколебательные системы и волновые усилители. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
8. Карачев А. А., Левченков О. И., Царапкин Д. П. Экспериментальное исследование двухчастотного режима генератора Ганна // Тр. МЭИ. Вып. 317. Радиопередающие и радиоприемные устройства. М.: Изд-во МЭИ, 1977. С. 36–38.
9. Theory of Spin Torque Nano-Oscillator-Based Phase-Locked Loop / A. A. Mitrofanov, A. R. Safin, N. N. Udalov, M. V. Kapranov // J. of applied physics. 2017. Vol. 122, iss. 12. Art. 123903. doi: 10.1063/1.5004117
10. Митрофанов А. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наносциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 16. С. 29–35.
11. Царапкин Д. П., Фролов Д. А. К анализу характеристик транзисторного автогенератора с двумя синхронными модами // Двадцать четвертая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 15–16 марта 2018 г.: тез. докл. М.: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2018. С. 19.
12. <http://www.nxp.com> (дата обращения 06.08.2020)
13. Rohde U., Poddar A., Bock G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications. Theory and Optimization. New York: John Wiley & Sons, 2005. 543 p. doi: 10.1002/0471727172.fmatter
14. Grebennikov A. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. New York: John Wiley & Sons, 2007. 458 p. doi: 10.1002/9780470512098
15. Капранов М. В., Томашевский А. И. Анализ фазовых траекторий в окрестностях особых точек 2-D и 3-D нелинейных динамических систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 80 с.
16. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. Введение в Octave для инженеров и математиков. М.: ALT Linux, 2012. 368 с. (Библиограф. ALTLinux).
17. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В., Рудченко Е. А. Scilab: Решение инженерных и математических задач. М.: ALTLinux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 260 с. (Библиограф. ALTLinux).

Информация об авторах

Фролов Даниил Андреевич – магистр наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2015), аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов (ФОРС) Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ" (ТУ). Сфера научных интересов – объемные резонаторы, радиотехника, стабилизация частоты автоколебаний.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ТУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: frolovdan12@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2014), доцент (2020), заведующий кафедрой ФОРС НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (РАН). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника, физика магнитных явлений, спинтроника.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ТУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

Удалов Николай Николаевич – доктор технических наук по специальности "Радиотехника" (1995), профессор (1996) кафедры ФОРС НИУ "МЭИ". Автор более 180 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника, системы фазовой автоподстройки.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ГУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: udalovnn@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0952-4076>

Сотсков Валерий Анатольевич – инженер по специальности "Радиотехника" (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, 1986), научный сотрудник Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Автор более 30 публикаций. Сфера научных интересов – радиотехника, электроника, системы передачи информации на основе волоконно-оптических линий связи.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт общей физики им. А. М. Прохорова" РАН, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия

E-mail: valerio07@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5152-251X>

References

1. Nosal Z. M. Design of GaAs MMIC Transistors for the Low-Power Low Noise Applications. 2000 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium. Boston, USA, 11–16 June 2000. Digest. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/MWSYM.2000.860872
2. Seif M., Pascal F., Sagnes B., Hoffmann A., Haendler S., Chevalier P., Gloria D. Low Frequency Noise Temperature Measurements in SiGe:C Heterojunction Bipolar Transistors. 2015 Intern. Conf. on Noise and Fluctuations. Xian, China, 2–6 June 2015. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/ICNF.2015.7288603
3. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator. IEEE Magnetics Letters. 2015, vol. 6, art. 3500704. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
4. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Lebedev V. V., Petrov A. N., Shamrai A. V., Kalinikos B. A. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics. J. of Phys.: Conf. Ser. 2019, vol. 1326, art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
5. Goryachev M., Galliou S., Imbaud J., Bourquin R., Dulmet B., Abbé P. Recent Investigations on BAW Resonators at Cryogenic Temperatures. 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proc., San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/FCS.2011.5977293
6. Tsarapkin D. P., Chichvarin M. I., Isakov I. A. Experimental Verification of Compensation Phenomena in Oscillators with Two Multiple Modes. Proc. of the 2000 IEEE/EIA Intern. Frequency Control Symposium and Exhibition, Kansas City, USA, 7–9 June 2000, pp. 463–470. doi: 10.1109/FREQ.2000.887401
7. Utkin G. M. self-Oscillating systems and volnew amplifiers. M., *Sov. radio*, 1978, 272 p. (In Russ.)
8. Karachev A. A., Levchenkov O. I., Carapkin D. P. Experimental study of the two-frequency response of the Gann generator. *Tr. MEI*. Radio transmitting and radio receiving devices, Moscow, MEI publishing House, 1977, iss. 317, pp. 36–38. (In Russ.)
9. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N., Kapranov M. V. Theory of Spin Torque Nano-Oscillator-Based Phase-Locked Loop. J. of applied physics. 2017, vol. 122, iss. 12, art. 123903. doi: 10.1063/1.5004117
10. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N. Amplitude and phase noise of a spin-transfer nanoscillator synchronized by a phase-locked frequency adjustment system. Letters to *ZhTF*. 2015, vol. 41, iss. 16, pp. 29–35 (In Russ.)
11. Carapkin D. P., Frolov D. A. To analyze the characteristics of a transistor autogenerator with two synchronous modes. Twenty-fourth int. scientific and technical Conf. of students and postgraduates. *TEZ. Dokl.* Moscow, March 15–16, 2018. M.: LLC "Center of printing services "Raduga", 2018, 19 p. (In Russ.)
12. <http://www.nxp.com> (accessed 06.08.2020)
13. Rohde U., Poddar A., Bock G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications. Theory and Optimization. New York, John Wiley & Sons, 2005, 543 p. doi: 10.1002/0471727172.fmatter
14. Grebennikov A. RF and microwave transistor oscillator design. New York, John Wiley & Sons, 2007, 458 p. doi: 10.1002/9780470512098
15. Kapranov M. V., Tomashevsky A. I. Analysis of phase trajectories in the vicinity of special points of 2-D and 3-D nonlinear dynamical systems. Textbook. Moscow, *Izd-vo MEI*, 2003, 80 p. (In Russ.)
16. Alekseev E. R., Chesnokova O. V. Introduction to Octave for engineers and mathematicians. Moscow, AL Linux, 2012, 368 p. (In Russ.)
17. Alekseev E. R., Chesnokova O. V., Rudchenko E. A. Scilab: Solving engineering and mathematical problems. Moscow, ALT Linux; BINOM. Laboratory of knowledge, 2008, 260 p. (Bibl. ALT Linux). (In Russ.)

Information about the authors

Daniil A. Frolov, Master of Sci. Degree in "Radio engineering including television systems and devices" (2015) postgraduate student of the department of Formation and processing of radio signals (FPRS) of the National Research University (NRU) "MPEI" (TU). Area of expertise: cavity resonators, radio engineering, frequency stabilization of oscillations.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: frolovdan12@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) in "Radio Engineering Including Television Systems and Devices" (2014), Associate Professor (2020), head of the department of radio signal generation and processing of the NRU "MPEI", senior researcher of the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science Named after V. A. Kotelnikov. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radiophysics and electronics, physics of magnetic phenomena, spintronics.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsafin@gmail.com

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

Nikolay N. Udalov, Dr. Sci. (Eng.) in Radio Engineering (1995), Professor (1996) of NRU MPEI (TU). Author of more than 180 scientific papers. Area of expertise: radio engineering, systems of phase locked loops.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: udalovnn@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0952-4076>

Valery A. Sotskov, Engineer on Radio Engineering (1986, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation), the researcher at the Institute of General Physics n. a. A. M. Prokhorov of RAS, Moscow. Author of more than 30 scientific papers. Area of expertise: radio engineering, electronics, information transmission systems based on fiber-optic communication lines.

Adress: Prokhorov General Physics Institute of RAS, 38, Vavilova St., Moscow 119991, Russia

E-mail: valerio07@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5152-251X>

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.677.71

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24>

Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS

В. Г. Кошкидько[✉], М. М. Мигалин

Институт радиотехнических систем и управления
Южного федерального университета, Таганрог, Россия

[✉]kvg59@mail.ru

Аннотация

Введение. Направление максимального излучения резонансных волноводно-щелевых антенных решеток совпадает с нормалью к продольной оси антенны. Такие антенны хорошо согласованы с питающей линией только в узкой полосе частот. При большом количестве элементов решетки даже незначительное отклонение от рабочей частоты приводит к существенному искажению диаграммы направленности. Устранение этих искажений в рабочей полосе частот становится актуальной задачей.

Цель работы. Сохранение в рабочей полосе частот неискаженной формы диаграммы направленности линейной резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, построенной на основе продольных щелей на широкой стенке прямоугольного волновода.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи применено разбиение волноводно-щелевой антенной решетки на несколько подрешеток. Построение модели исследуемой структуры и анализ ее направленных свойств проведены в САПР Ansys HFSS с использованием макросов на языке Visual Basic Scripting Edition.

Результаты. В САПР Ansys HFSS разработаны 3 модели волноводно-щелевых антенных решеток, состоящие из двух, четырех и восьми подрешеток. Исследовано влияние разбиения антенны на подрешетки на диаграмму направленности на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона. Показано, что при разбиении антенны на подрешетки ширину главного лепестка диаграммы направленности на крайних частотах удается уменьшить с 2.4 до 1.0° и сравнить со значением этого параметра на центральной частоте.

Заключение. Исследования показали, что разбиение резонансной волноводно-щелевой антенной решетки на подрешетки является эффективной мерой, позволяющей добиться сохранения неискаженной диаграммы направленности в рабочей полосе частот. Сравнение полученных результатов с характеристиками антенны, не имеющей разбиения на подрешетки, показывает, что в области главного лепестка диаграммы направленности на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона совпадают с графической точностью, а уровень боковых лепестков не превышает –20 дБ.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, подрешетки, полоса рабочих частот, САПР, макрос, VBScript

Для цитирования: Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.05.2020; принята к публикации после рецензирования 03.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS

Vladimir G. Koshkid'ko✉, Mikhail M. Migalin

Radio engineering systems and control institute
of Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉kvg59@mail.ru

Abstract

Introduction. A resonant slotted waveguide antenna allows providing broadside radiation, which coincides with the normal line to the longitudinal axis of the array. Such an antenna can be well-matched in a very narrow frequency band. Even a slight deviation from the operating frequency leads to a significant distortion of the radiation pattern. In this regard, the distortion of the radiation pattern is becoming an urgent task.

Aim. The main objective of this work is to preserve the radiation pattern of the resonant slotted waveguide antenna with longitudinal slots in the broad face in operating bandwidth.

Materials and methods. Subarraying was performed to preserve the undistorted radiation pattern of the slotted waveguide antenna array in the operating bandwidth. The antenna model and its directional properties were analyzed in CAD Ansys HFSS using Visual Basic Scripting Edition macros.

Results. Three slotted waveguide antennas' models, consisting of two, four, and eight subarrays were developed in Ansys HFSS CAD. The effect of subarraying on the radiation pattern at the center frequency and the upper and the lower operating frequencies is studied. It is shown that the growing number of subarrays leads to a more stable radiation pattern in the operating bandwidth.

Conclusions. Full-wave electromagnetic simulations have shown that subarraying of a resonant slotted waveguide antenna is a useful measure that preserves undistorted radiation pattern in the operating frequency band. Usage of Visual Basic Scripting Edition macros allows to minimizing the time spent creating a model in CAD Ansys HFSS.

Keywords: slotted waveguide antenna, subarraying, operating frequency band, CAD, macros, VBScript

For citation: Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 15-24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 21.05.2020; accepted 03.07.2020; published online 29.09.2020

Введение. Волноводно-щелевые антенны (ВЩА) широко применяются как в системах связи, так и в радиолокации, поскольку имеют высокие направленные свойства, компактные размеры, невыступающий профиль, высокую эффективность излучения и простоту подведения питания. Разработке общей теории ВЩА посвящены работы как отечественных ученых [1–13], так и зарубежных исследователей [14–23]. Достаточно подробный обзор развития решений синтеза ВЩА представлен в [12, 13].

Существует несколько методов расчета резонансных ВЩА: метод последовательных приближе-

ний, метод рекуррентных соотношений, энергетический метод [1].

Выбор метода синтеза ВЩА определяется числом допущений при расчете антенны. По мере распространения электромагнитных волн они затухают в связи с потерями на излучение и тепловыми потерями. Излучение щелей как во внутреннее, так и во внешнее относительно волновода пространство вызвано протекающими по внутренним стенкам волновода токами. Близкорасположенные щелевые излучатели взаимодействуют между собой, что выражается в изменении их эквивалентных импедансов.

Щели представляют собой неоднородности для распространяющегося поля и вызывают в волноводе появление высших типов волн. Основной вклад во взаимодействие излучателей вносит волна основного типа, что ведет к отклонению амплитудно-фазового распределения от требуемого. Из-за этого наблюдается отклонение реализуемой диаграммы направленности (ДН) от заданной.

Для учета взаимодействия щелей как во внешнем, так и во внутреннем пространстве, а также учета как основного, так и высших типов волн применяются строгие в электродинамическом отношении методы на основе интегральных уравнений. Однако громоздкость и трудоемкость вычислений существенно усложняют использование данного метода при проектировании ВЩА.

В случае, когда для учета взаимодействия щелей учитывается только основной тип волны в волноводе и учитывается взаимодействие только по внутреннему пространству, применяется метод рекуррентных соотношений. Данный метод заключается в определении мощности и фазы излучения каждого излучателя при помощи теории четырехполюсников.

Наиболее простым методом синтеза ВЩА является энергетический метод. Данный метод не учитывает взаимодействия щелей ни по внешнему, ни по внутреннему пространствам. Метод предполагает, что в прямоугольном волноводе фазовый сдвиг между соседними щелевыми излучателями равен электрическому расстоянию между ними, а фазовое распределение в раскрыве волноводно-щелевой антенны – линейное. Несмотря на простоту, уже для числа щелей $N \geq 15$ энергетический метод дает результаты, достаточно близкие к полученным строгими методами [1]. Поэтому для расчета исследуемой антенны был использован энергетический метод.

В системах связи часто используются сигналы сложной формы, обладающие широким спектром, что выдвигает требования к сохранению формы ДН ВЩА в полосе частот. В [24, 25] представлены результаты проектирования и анализа линейной резонансной ВЩА для рабочей частоты 10.8 ГГц, содержащей 88 продольных щелей на широкой стенке прямоугольного волновода.

На указанной частоте ДН ВЩА имеет классическую форму, полностью удовлетворяющую требованиям технического задания. Однако при отклонении от центральной частоты ДН претерпевает значительные искажения. На рис. 1 пред-

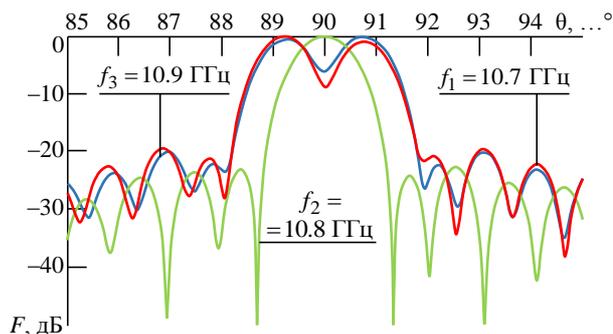


Рис. 1. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны при количестве щелей $N = 88$
 Fig. 1. Radiation Pattern of a Resonant Waveguide-Slot Antenna with the Number of Slots $N = 88$

ставлены ДН антенны $F(\theta)$ для центральной частоты $f_2 = 10.8$ ГГц и для крайних частот рабочего диапазона ($f_1 = 10.7$ ГГц, $f_3 = 10.9$ ГГц).

Как следует из рис. 1, на крайних частотах главный лепесток ДН расширился в 1.5 раза, вблизи нормали к поверхности решетки появился провал, а также увеличился уровень боковых лепестков (УБЛ).

Очевидно, что искажение ДН происходит из-за частотной зависимости набег фаз между щелями и связанным с этим нарушением синфазности возбуждения излучателей в ВЩА.

В [23] показано, что полоса рабочих частот ВЩА уменьшается при увеличении числа щелей и определяется соотношением

$$\Delta f = \frac{c}{2a} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{N - 0.25 a}{N - 0.5 d} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{N - 0.75 a}{N - 0.5 d} \right)^2} \right\},$$

где c – скорость света; a – ширина широкой стенки прямоугольного волновода, на которой расположены щели; N – количество щелей; $d = \lambda_B/2$ – шаг ВЩА, причем

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda/(2a)]^2}}$$

– длина волны в волноводе (λ – длина волны в свободном пространстве).

В связи с этим одним из методов обеспечения работы ВЩА в полосе частот является разбиение антенны на подрешетки [14, 16, 23].

В настоящей статье исследуется изменение формы ДН ВЩА на центральной частоте и на

крайних частотах рабочего диапазона в зависимости от количества подрешеток с помощью САПР Ansys HFSS.

Постановка задачи. Требуется расширить диапазон рабочих частот ВЩА с излучением в направлении нормали к широкой стенке, описанной в [24]. Необходимо получить следующие параметры антенны:

- диапазон рабочих частот 10.8 ± 0.1 ГГц;
- ширина главного лепестка ДН в Н-плоскости 1° ;
- УБЛ в Н-плоскости -20 дБ;
- максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА;
- поляризация вертикальная;
- излучаемая мощность менее 5 Вт.

Конструкция ВЩА. Для оценки эффективности примененного метода необходимо построить эталонную ВЩА, с характеристиками которой будет сравниваться ДН антенны, разбитой на подрешетки. В качестве эталонной рассмотрим ВЩА на основе прямоугольного волновода стандартного сечения $a = 23$ мм, $b = 10$ мм, закороченного с обеих сторон (рис. 2). Вертикальная поляризация излучения реализована размещением продольных щелей в шахматном порядке на широкой стенке волновода. Для обеспечения заданного УБЛ принято распределение поля $f(z)$ вида "косинус в квадрате на пьедестале" [26]. Шаг ВЩА выбран равным $d = \lambda_{\text{в}}/2$ для синфазного возбуждения щелей, что обеспечивает направление максимума излучения перпендикулярно оси антенны ($\theta = 90^\circ$).

При выбранном шаге ВЩА d подавление дифракционных максимумов осуществляется при выполнении условия [1]

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \cos(\theta)}. \quad (1)$$

При $\theta = 90^\circ$ условие (1) примет вид $d \leq \lambda$, что при выбранном шаге ВЩА d для основного типа волны H_{10} выполняется всегда.

Количество щелей N , необходимое для обеспечения заданной ширины ДН в Н-плоскости, можно найти из формулы, приведенной в [1]:

$$2\theta_{0.5}^H = \frac{57.4\lambda}{Nd}. \quad (2)$$

Сделав необходимые преобразования, из (2) получим число щелей $N = 92$. В результате моделирования в САПР Ansys HFSS [24] получено, что для достижения требуемой ширины ДН в Н-плоскости число щелей можно сократить до $N = 88$.

Согласно энергетическому методу, при входной проводимости ВЩА, равной $g_{\text{вх}}$, эквивалентная нормированная проводимость n -й щели g_n может быть рассчитана через распределение поля $f(z)$ по формуле [1]

$$g_n = g_{\text{вх}} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{m=1}^N f^2(z_m)}. \quad (3)$$

Согласно [27] для обеспечения согласования антенны с питающим волноводом нормированная входная проводимость должна быть выбрана следующим образом: $g_{\text{вх}} = 1$ при возбуждении ВЩА с одного из концов и $g_{\text{вх}} = 2$ при возбуждении в центре.

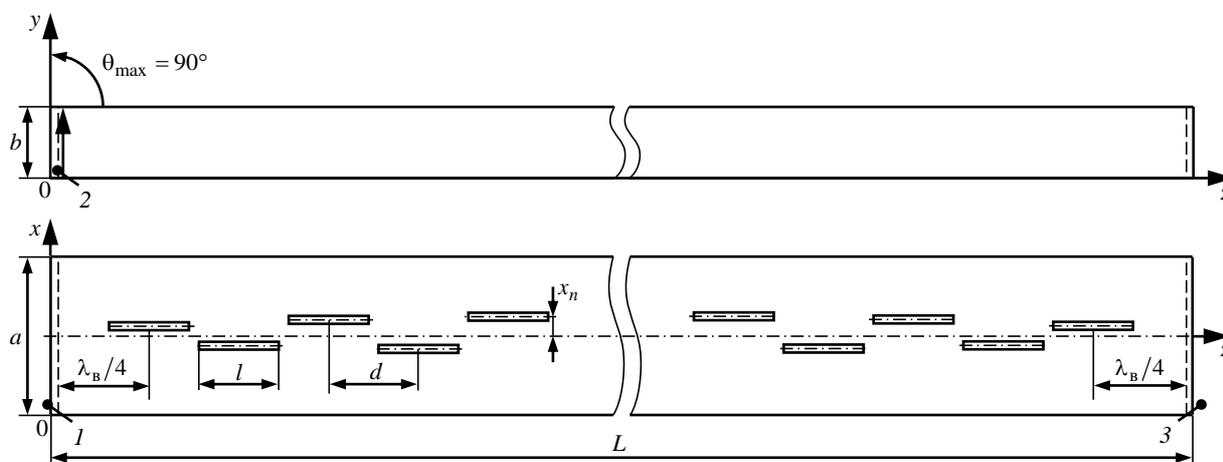


Рис. 2. Модель эталонной волноводно-щелевой антенны: 1, 3 – короткозамыкатели; 2 – порт

Fig. 2. Model of the reference waveguide-slot antenna: 1, 3 – short circuits; 2 – port

С другой стороны, проводимость продольной щели на широкой стенке прямоугольного волновода определяется соотношением [1]

$$g_n = 2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x_n}{a} \right), \quad (4)$$

где x_n – расстояние (сдвиг) продольной оси n -й щели от средней линии (оси) волновода.

Для построения модели антенны необходимо знать координаты каждой щели. Положение центра n -й щели вдоль оси z относительно короткозамыкателя волновода определяется выражением

$$z_n = (2n - 1)(\lambda_B/4), \quad n = 1 \dots N. \quad (5)$$

Сдвиг n -й щели относительно средней линии широкой стенки волновода рассчитывается по формуле, полученной из (4):

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right)^2}}. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в настоящей статье не учитывается явление изменения резонансной длины щели, вызванное как конечной толщиной стенки волновода, так и смещением излучающих щелей относительно его средней линии [15].

Построение модели эталонной резонансной ВЩА в САПР Ansys HFSS. Для анализа направленных свойств эталонной ВЩА проведено моделирование в САПР Ansys HFSS. Модель ВЩА состоит из горизонтально расположенного излучающего волновода с идеально проводящими стенками, закороченного с обеих сторон, на широкой стенке которого расположено 88 продольных щелей (рис. 2).

Массивы координат щелей x_n, z_n рассчитывались и формировались в пакете компьютерной алгебры Mathcad с использованием выражений (3), (5) и (6). Эти массивы из Mathcad экспортировались в текстовые файлы. При построении модели ВЩА в САПР Ansys HFSS использовались описанные в [24, 27, 29] макросы на языке Visual Basic Scripting Edition (VBScript), с помощью которых описано "вырезание" поочередно всех щелей на широкой стенке прямоугольного волновода по координатам из текстовых файлов, сформированным в Mathcad.

Ширина щелей принята равной 1 мм, что обеспечило невысокую добротность и достаточную электрическую прочность [1]. Длину ВЩА L определяют z -координата центра последней щели и расстояние $\lambda_B/4$ до короткозамыкателя.

ДН эталонной модели ВЩА на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона представлены на рис. 1 [24].

Построение модели резонансной ВЩА с подрешетками в САПР Ansys HFSS. Отличием модели резонансной ВЩА с подрешетками (фрагмент такой ВЩА представлен на рис. 3) от эталонной модели является наличие идеально проводящих перегородок (рис. 3, 3) внутри излучающего волновода (рис. 3, 1), которые разбивают исследуемую ВЩА на подрешетки. Каждая подрешетка возбуждается при помощи питающего волновода (рис. 3, 4) через наклонную возбуждающую щель (рис. 3, 6), прорезанную в соприкасающихся широких стенках под углом $\alpha = 45^\circ$ к продольной оси волновода. Каждый питающий волновод закорочен с одной стороны (рис. 3, 7), а с другой – возбужден волноводным портом (рис. 3, 5) с основным типом волны H_{10} . Расстояние от центра питающей щели

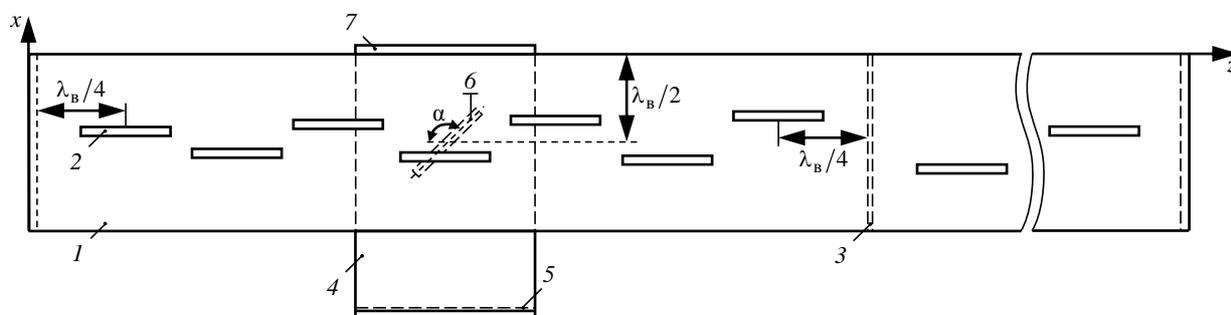


Рис. 3. Возбуждение одной из подрешеток волноводно-щелевой антенны: 1 – излучающий волновод; 2 – излучающая щель; 3 – перегородка; 4 – питающий волновод; 5 – порт; 6 – возбуждающая щель; 7 – короткозамыкатель

Fig. 3. Excitation of one of the sublattices of the waveguide-slot antenna: 1 – radiating waveguide; 2 – radiating slot; 3 – partition; 4 – supply waveguide; 5 – port; 6 – energize slot; 7 – short circuit

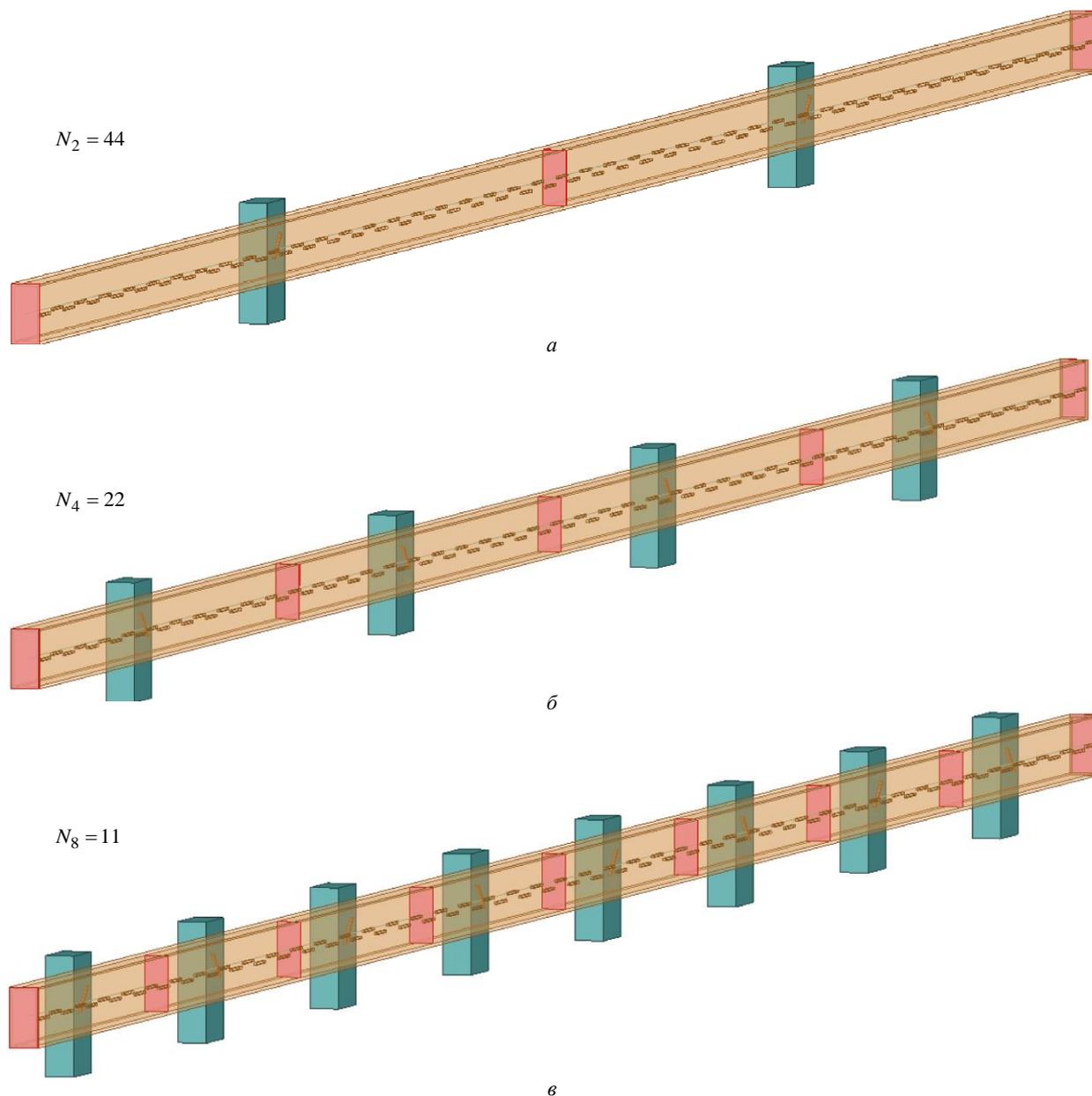


Рис. 4. Волноводно-щелевые антенны, состоящие из нескольких подрешеток:
a – 2 подрешетки; *б* – 4 подрешетки; *в* – 8 подрешеток

Fig. 4. Waveguide-slot antennas, consisting of multiple subarrays: *a* – two sublattices; *b* – four sublattices; *c* – eight sublattices

до короткозамыкателя питающего волновода составляет $\lambda_B/2$.

Результаты моделирования ВЩА с подрешетками в САПР Ansys HFSS. Для исследования изменения формы ДН ВЩА в зависимости от количества подрешеток на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона ВЩА была разделена на 2, 4 и 8 подрешеток идеально проводящими перегородками (рис. 4). Количество щелей в подрешетках составило: при двух подрешетках (рис. 4, *a*) $N_2 = 44$; при четырех (рис. 4, *б*) $N_4 = 22$; при восьми подрешетках (рис. 4, *в*) $N_8 = 11$.

В ВЩА с двумя и четырьмя подрешетками щели во всех питающих волноводах наклонены на одинаковый угол α . В антенне с восемью подрешетками щели в питающих волноводах соседних подрешеток расположены встречно-наклонно. Такое различие вызвано тем, что в первых двух случаях количество щелей в подрешетках является четным, а в третьем случае – нечетным.

На рис. 5 приведены результаты моделирования антенны, состоящей из двух подрешеток. Как следует из него, на центральной частоте диапазона

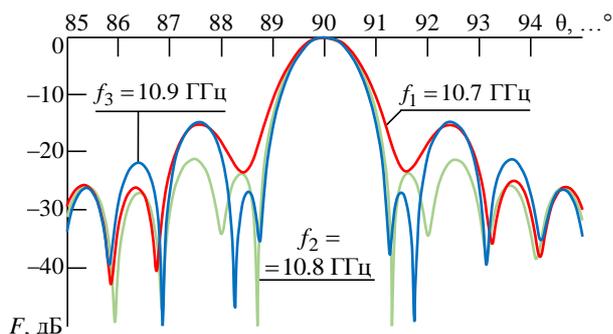


Рис. 5. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из двух подрешеток

Fig. 5. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of two subarrays

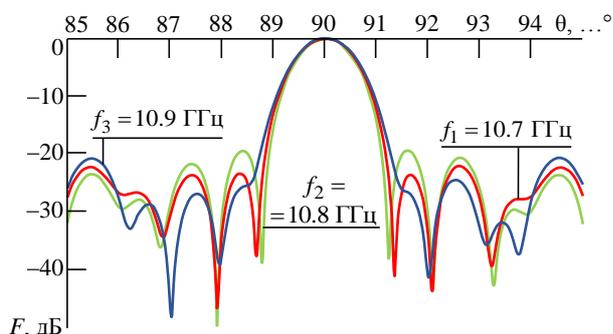


Рис. 6. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из четырех подрешеток

Fig. 6. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of four subarrays

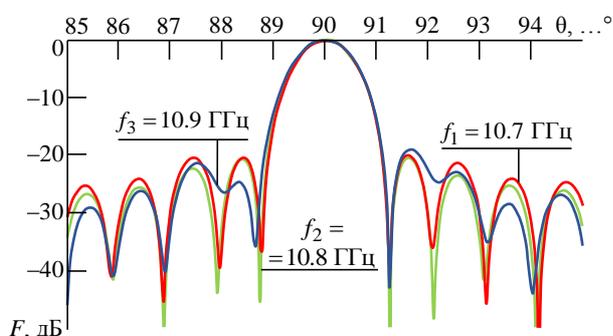


Рис. 7. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из восьми подрешеток

Fig. 7. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of eight subarrays

$f_2 = 10.8$ ГГц форма ДН $F(\theta)$ с высокой точностью совпадает с ДН эталонной ВЩА (см. рис. 1), полученной в [24]. На крайних частотах рабочего диапазона по сравнению с ДН, приведенными на рис. 1, во-первых, исчез провал в центральной части главного лепестка ДН; во-вторых, ширина ДН приблизилась к значению $2\theta_{0,5}^H = 1^\circ$, соответствующему ширине ДН на центральной частоте (на

нижней частоте $f_1 = 10.7$ ГГц ширина ДН $2\theta_{0,5}^H = 1.1^\circ$, на верхней частоте $f_3 = 10.9$ ГГц $2\theta_{0,5}^H = 0.9^\circ$). Однако значение УБЛ осталось еще достаточно высоким (-14 дБ).

На рис. 6 приведены результаты моделирования антенны, состоящей из четырех подрешеток. Заметно улучшение ДН $F(\theta)$ на крайних частотах по сравнению с рис. 5 как в области главного, так и боковых лепестков. Так, ширина главного лепестка ДН стала одинаковой на крайних частотах и достигла значения $2\theta_{0,5}^H = 1.04^\circ$, хотя еще имеются различия в форме ДН на нижней и верхней частотах (на нижней частоте ДН в области первых двух боковых лепестков имеет классический вид, а на верхней частоте из-за расширения первого бокового лепестка провал между ним и центральным лепестком почти исчезает). УБЛ снизился и фактически приблизился к его значению на центральной частоте (-19 дБ).

Результаты моделирования антенны, состоящей из восьми подрешеток, приведены на рис. 7. Форма ДН $F(\theta)$ этой ВЩА на центральной и на крайних частотах рабочего диапазона фактически идентична в пределах главного лепестка. Ширина ДН во всей полосе частот составляет $2\theta_{0,5}^H = 1^\circ$. Боковые лепестки на крайних частотах как по форме, так и по уровню приближены к значению УБЛ на центральной частоте, равному -20 дБ.

Заключение. Исследования показали, что разбиение резонансной ВЩА на подрешетки является эффективной мерой, позволяющей добиться сохранения неискаженной ДН в рабочей полосе частот. Сравнение полученных результатов с характеристиками антенны, не имеющей разбиения на подрешетки, показывает, что разбиение резонансной ВЩА-решетки всего лишь на две подрешетки позволяет устранить провал в центральной части главного лепестка ДН, а также уменьшить ширину главного лепестка ДН на крайних частотах более чем в 2 раза (с 2.4 до 1.1°) и приблизиться к значению этого параметра на центральной частоте. Дальнейшим увеличением количества подрешеток можно добиться того, что в области главного лепестка ДН на центральной и крайних частотах рабочего диапазона будут совпадать с графической точностью, а уровень боковых лепестков не будет превышать требуемого значения (при моделировании оно принято равным -20 дБ и достигнуто при разделении ВЩА на 8 подрешеток).

Список литературы

1. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование антенных решеток: учеб. пособие для вузов; под ред. Д. И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Вешникова И. Е., Евстропов Г. А. Теория согласованных щелевых излучателей // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10, № 7. С. 1181–1189.
3. Евстропов Г. А., Царапкин С. А. Расчет волноводно-щелевых антенн с учетом взаимодействия излучателей по основной волне // Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11, № 5. С. 822–830.
4. Лось В. Ф., Космодамианская Н. С. Метод расчета амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве волноводно-щелевой решетки с учетом внутреннего взаимодействия излучателей // Антенны. 1974. Вып. 20. С. 24–32.
5. Яцук Л. П., Жиронкина А. В., Катрич А. В. Возбуждение прямоугольного волновода наклонной и крестообразной щелями // Антенны. 1975. Вып. 22. С. 46–59.
6. Ершов Л. И., Кременецкий С. Д., Лось В. Ф. Электродинамика взаимовлияния в нерезонансных волноводно-щелевых решетках // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21, № 2. С. 48–54.
7. Электродинамические факторы взаимной связи при проектировании волноводно-щелевых решеток / Л. Д. Бахрах, Л. И. Ершов, С. Д. Кременецкий, В. Ф. Лось // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 2. С. 314–317.
8. Ряполов В. В. Расчет волноводно-щелевых резонансных антенн с продольными излучающими щелями // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 2 (374). С. 29–33.
9. Иванов М. А., Ряполов В. В., Хавкина Т. А. Расчет волноводно-щелевых резонансных антенных решеток // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 10 (434). С. 9–13.
10. Кошкина Т. В., Максимов О. М. Влияние толщины стенки волновода на резонансную длину излучающих узких прямоугольных щелей // Антенны. 2003. № 12. С. 49–54. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1966> (дата обращения 22.03.2020).
11. Банков С. Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013. 416 с.
12. Кременецкий С. Д., Лось В. Ф., Шаманов А. Н. Волноводно-щелевые антенные решетки // Антенны. 2004. № 8–9. С. 47–55. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1879> (дата обращения 22.03.2020).
13. Кашин А. В. Методы проектирования и исследования волноводно-щелевых антенных решеток // Антенны. 2006. № 3. С. 3–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9213036> (дата обращения 22.03.2020).
14. Richardson P. N., Lee H. Y. Design and Analysis of Slotted Waveguide Arrays // Microwave J. 1988. № 6. P. 109–125. doi: 10.1002/1098-2760(20001220)27:63.3.CO;2-J
15. Stern G., Elliott R. Resonant Length of Longitudinal Slots and Validity of Circuit Representation. Theory and experiment // IEEE Trans. on Antennas and Propagation 1985. Vol. 33, № 11. P. 1264–1271. doi: 10.1109/TAP.1985.1143509
16. Coetzee J., Joubert J. W., Tan L. Frequency Performance Enhancement of Resonant Slotted Waveguide Arrays through the Use of Wideband Radiator or Subarranging // Microwave and Optical Technology Lett. 1999. Vol. 22. P. 35–39.
17. Park P. K., Pavlov I. Yu. Characterization of Dumbbell Slots in Rectangular Waveguide by Method of Moments // Proc. 1984 Antennas Applications Symp., IL, USA, Sept. 1984. Piscataway: IEEE, 1984. P. 1–6.
18. Elliott R. S., Kurtz L. A. The Design of Small Slot Arrays // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1978. Vol. AP-26, iss. 2. P. 214–219. doi: 10.1109/TAP.1978.1141814
19. Elliott R. S. On the Design of Traveling-Wave-Fed Longitudinal Shunt Slot Arrays // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1979. Vol. AP-27, iss. 5. P. 717–720. doi: 10.1109/TAP.1979.1142166
20. Elliott R. S. An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31, № 1. P. 48–53. doi: 10.1109/TAP.1983.1143002
21. Elliott R. S., O'Loughlin W. R. The Design of Slot Arrays including Internal Mutual Coupling // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. AP-34, № 9. P. 1149–1154. doi: 10.1109/TAP.1986.1143947
22. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New York: John Wiley & Sons, 2003. 612 p.
23. Sekretarov S. S., Vavriv D. M. A Wideband Slotted Waveguide Antenna Array for SAR Systems // Progress in Electromagnetics Research M. 2010. Vol. 11. P. 165–176. URL: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm11/14.10010606.pdf> (дата обращения 22.03.2020).
24. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653
25. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквидистантной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (дата обращения 22.03.2020).
26. Семенихин А. И., Кошкидько В. Г., Климов А. В. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad: учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. 80 с. URL: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800914249/> (дата обращения: 22.03.2020).
27. Johnson R. C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. 2nd ed. Portland: McGraw-Hill, 1993. 1408 p.
28. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide

Antenna Consisting of Subarrays// 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway: IEEE, 2017. P. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019. 8792768

29. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР AnsysHFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17

Информация об авторах

Кошкидько Владимир Георгиевич – кандидат технических наук (1988), доцент (1993) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета г. Таганрога. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2008). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследования в области электромагнетизма и прикладной электродинамики (рассеяние электромагнитных волн импедансными структурами; импедансные, щелевые и микрополосковые электродинамические структуры; микрополосковые антенны; антенны с реактивными нагрузками).

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер, д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Мигалин Михаил Михайлович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2020), аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета г. Таганрога. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – исследование периодических антенных структур, фазированные антенные решетки и анализ диэлектрических свойств материалов.

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер, д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>

References

1. Voskresenky D. I. Microwave devices and antennas. Antenna array design: Textbook for universities; editor D. I. Voskresenky. 4th ed. M.: *Radiotekhnika*, 2012, 744 p. (In Russ.)

2. Veshnikova I. E., Evstropov G. A., Theory of matched slot radiators. *Radiotekhnika and electronica*. 1965, vol. 10, no. 7, pp. 1181–1189. (In Russ.)

3. Evstropov G. A, Tsarapkin S. A. Calculation of waveguide-slot antennas given the TE₁₀ interaction of emitters. *Radiotekhnika and electronica*. 1966, vol. 11, no. 5, pp. 822–830. (In Russ.)

4. Los V. F., Kosmodamianskaya N. S. The amplitude-phase distribution calculation method of the field in the aperture of the slotted waveguide array in consideration of the internal interaction of the emitters. *Antenny*. 1974, vol. 20, pp. 24–32. (In Russ.)

5. Yatsuk L. P., Zhironkina A. V., Katrich A. V. Excitation of a rectangular waveguide by inclined and cruciform slots. *Antenny*. 1975, no. 22, pp. 46–59. (In Russ.)

6. Ershov L. I, Kremenetsky S. D., Los V. F. Electrodynamics of mutual coupling in nonresonant slotted waveguide antennas. *Izv. Vuzov, Ser. Radioelectronica*, 1978, vol. 21, no. 2, pp. 48–54. (In Russ.)

7. Bakhrahk L. D., Ershov L. I., Kremenetsky S. D., Los V. F. Consideration of the electrodynamic factors of mutual coupling in the design of slotted waveguide antennas. *Rep. of the USSR Academy of Sciences*, 1978, vol. 243, no. 2, pp. 314–317. (In Russ.)

8. Ryapolov V. V. Calculation of resonant slotted waveguide antennas with longitudinal radiating slots. *Electronnaya tekhnika, Ser. Electronica SVCH*. 1985, no. 2 (374), pp. 29–33. (In Russ.)

9. Ivanov M. A., Ryapolov V. V., Khavkina T. A. Calculation of the slotted waveguide antenna arrays. *Electronnaya tekhnika, Ser. Electronica SVCH*. 1990, no. 10 (434), pp. 9–13. (In Russ.)

10. Koshkina T. V., Maksimov O. M. Influence of the wall thickness of the waveguide on the resonant length of narrow radiating rectangular slots. *Antenny*. 2003, no. 12, pp. 49–54. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1966> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

11. Bankov S. E. Antenna arrays with sequential feeding. Moscow, Fizmatlit, 2013, 416 p. (In Russ.)

12. Kremenetsky S. D., Los V. F., Shamanov A. N. Slotted waveguide antenna arrays. *Antenny*. 2004, no. 8–9, pp. 47–55. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1879> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

13. Kashin A. V. Design and research methods of the slotted waveguide antenna arrays. *Antenny*. 2006, no. 3, pp. 3–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9213036> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

14. Richardson P. N., Lee H. Y. Design and Analysis of Slotted Waveguide Arrays. *Microwave J*. 1988, no. 6, pp. 109–125. doi: 10.1002/1098-2760(20001220)27:63.3.CO;2-J (accessed 22.03.2020)

15. Stern G., Elliott R. Resonant Length of Longitudi-

nal Slots and Validity of Circuit Representation. Theory and experiment. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1985, vol. 33, no. 11, pp. 1264–1271. doi: 10.1109/TAP.1985.1143509 (accessed 22.03.2020)

16. Coetzee J., Joubert J. W., Tan L. Frequency Performance Enhancement of Resonant Slotted Waveguide Arrays through the Use of Wideband Radiator or Subarraying. Microwave and Optical Technology Letters. 1999, vol. 22, pp. 35–39.

17. Park P. K., Pavlov I. Yu. Characterization of Dumbbell Slots in Rectangular Waveguide by Method of Moments. Proc. 1984 Antennas Applications Symp., IL, USA, Sept. 1984. Piscataway, IEEE, 1984, pp. 1–6.

18. Elliott R. S., Kurtz L. A. The Design of Small Slot Arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1978, vol. AP-26, iss. 2, pp. 214–219. doi: 10.1109/TAP.1978.1141814 (accessed 22.03.2020).

19. Elliott R. S. On the Design of Traveling-Wave-Fed Longitudinal Shunt Slot Arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1979, vol. AP-27, iss. 5, pp. 717–720. doi: 10.1109/TAP.1979.1142166

20. Elliott R. S. An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1983, vol. AP-31, no. 1, pp. 48–53. doi: 10.1109/TAP.1983.1143002

21. Elliott R. S., O'Loughlin W. R. The Design of Slot Arrays including Internal Mutual Coupling. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986, vol. AP-34, no. 9, pp. 1149–1154. doi: 10.1109/TAP.1986.1143947

22. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New York, John Wiley & Sons, 2003. 612 p.

23. Sekretarov S. S., Vavriv D. M. A Wideband Slotted Waveguide Antenna Array for SAR Systems // Progress in

Electromagnetics Research M. 2010, vol. 11, pp. 165–176. URL: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm11/14.10010606.pdf> (accessed 22.03.2020)

24. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653

25. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and investigation of a linear equidistant slotted waveguide antenna. Antenny. 2018, no. 2, pp. 15–20. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

26. Semenikhin A. I., Koshkidko V. G., Klimov A. V. Dish antennas design using the Mathcad package. Tutorial. Taganrog, SFEDU Publishing House, 2016, 80 p. URL: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800914249/> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

27. Johnson R. C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. 2nd ed. Portland, McGraw-Hill, 1993. 1408 p.

28. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna Consisting of Subarrays. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792768

29. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020; vol. 23, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17 (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir G. Koshkid'ko, Cand. of Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University in Taganrog, Russia. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2008). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: electromagnetics and applied electrodynamics; electromagnetic waves scattering by impedance structures; impedance, slot and microstrip electromagnetic structures; microstrip antennas; reactive loaded antennas.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Mikhail M. Migalin, Master of Science on Infocommunication technologies and communication systems (2020), post graduate student of the department of Antennas and radio transmitting devices of Southern Federal University in Taganrog, Russia. The author of 10 scientific papers. Area of expertise: periodic antenna structures; antenna arrays and materials' dielectric properties analysis.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.37

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-25-37>

Спектральная эффективность беспроводной релейной сети в частотно-неселективном канале

Е. А. Маврычев✉, Е. Н. Приблудова, С. Б. Сидоров

Нижегородский государственный технический университет
им. П. Е. Алексеева, Н. Новгород, Россия

✉ mavrychev.eugene@mail.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрена беспроводная система передачи данных, построенная на основе релейной сети, в которой связь между источником и приемником осуществляется через сеть релейных станций. Релейные станции работают по протоколу "усиление и передача", при котором каждая станция выполняет прием сигнала, усиление, поворот фазы и передачу на станцию-приемник. В результате возникает задача оптимизации мощностей и фазовых сдвигов, излучаемых релейными узлами, т. е. комплексных коэффициентов передачи этих узлов. Комплексные весовые коэффициенты релейных узлов оптимизируются таким образом, чтобы обеспечить максимальное отношение сигнал/шум в приемнике, при этом накладываются ограничения на мощности, излучаемые релейными узлами. В настоящей статье рассмотрена оптимизация пространственной обработки сигналов при наличии различной априорной информации о состоянии канала.

Цель работы. Анализ спектральной эффективности беспроводной релейной сети в рэлеевском канале с оптимальной пространственной обработкой при наличии априорной информации двух видов: о мгновенном состоянии канала и знании статистик второго порядка.

Материалы и методы. Оптимизация пространственной обработки в релейной сети основана на методах статистической теории и теории оптимизации с использованием аппарата линейной алгебры и численного решения оптимизационных задач. Характеристики релейной сети анализируются с помощью математического моделирования на основе метода Монте-Карло. Статистическое моделирование выполняется в среде MatLab с использованием стандартных средств, а также пакета CVX для численного решения выпуклых оптимизационных задач.

Результаты. Представлены оптимальные решения для пространственной обработки сигналов релейной сети, основанные на критерии максимума отношения сигнал/шум при ограничении суммарной мощности сети или индивидуальных мощностей узлов сети. Проведено статистическое моделирование, получены спектральные эффективности релейной сети при наличии различного вида априорной информации о канале распространения сигнала и различных параметров канала. Получены зависимости средней пропускной способности для случайного рэлеевского канала от мощности источника и бюджета мощности на релейных узлах, а также статистических параметров канала, а именно коэффициентов, характеризующих соотношение между случайной и детерминированной составляющими канала.

Заключение. Полученные результаты имеют практическое применение. Так использование знания статистик второго порядка возможно в релейных сетях, в которых обеспечивается условие прямой видимости с малым уровнем фона от местных предметов. В условиях городской застройки, при которых возникают затенения и многолучевое распространение сигналов, возможно использование только подхода, основанного на знании мгновенного состояния канала.

Ключевые слова: релейная сеть, пространственная обработка сигналов, пропускная способность, многолучевой канал, критерий максимума отношения сигнал/шум

Для цитирования: Маврычев Е. А., Приблудова Е. Н., Сидоров С. Б. Спектральная эффективность беспроводной релейной сети в частотно-неселективном канале // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 25–37. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-25-37

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2020; принята к публикации после рецензирования 15.06.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



Spectral Efficiency of Wireless Relay Network in Frequency Non-Selective Channel

Evgeny A. Mavrychev[✉], Elena N. Pribludova, Sergey B. Sidorov

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

✉ mavrychev.eugene@mail.ru

Abstract

Introduction. A wireless communication system based on a relay network where a link between a source and a destination is carried out through a network of relay nodes have been considered. Relay networks operate according with amplifier-and-forward protocol where each relay node performs reception, amplifying, phase shifting and retranslation of a signal to the destination node. As a result a task of powers and phases optimization in the relay nodes (i.e. the complex weighted coefficients optimization) becomes actual. Complex weighted coefficients of the relay nodes are optimized in such a way as to ensure the maximum signal to noise ratio at the receiver while limiting a power emitted by the relay nodes. In the paper, optimization of spatial processing with different a priori channel state information (i.e. instantaneous channel state information and the second order statistics) have been considered.

Aim. Spectral efficiency analysis of a relay network in a multipath channel where the relay network was optimized by using of two types a priori information: an instantaneous channel state information and second order statistics.

Materials and methods. Optimization of spatial signal processing in the relay network was based on methods of statistical theory and optimization using analytics of linear algebra and methods of mathematical programming. Performances of the relay network were analyzed using Monte Carlo simulation. The simulation was performed in MATLAB program environment using CVX toolbox for solving convex optimization task.

Results. In the paper optimal solutions for spatial signal processing in the relay network were presented. The solutions were based on maximum of signal to noise ratio while limiting total relay power and individual power of relay nodes. Monte Carlo simulation was performed to provide performances of the relay network for different types of channel state information and channel parameters. Mean capacities versus mean source power, a budget of relay nodes power and a ratio between random and deterministic power of the channel were gained for the Rayleigh model of multipath channel.

Conclusions. The results have a practical application. Thus, the use of the second order statistics is possible in relay networks when direct visibility with a low level of background from local objects is provided. In urban areas, where shading and multipath propagation of signals occur, it is possible to use only an approach based on the knowledge of channel instantaneous state.

Keywords: relay network, spatial signal processing, capacity, multipath channel, criterion on maximum of signal-to-noise ratio

For citation: Mavrychev E. A., Pribludova E. N., Sidorov S. B. Spectral Efficiency of Wireless Relay Network in Frequency Non-Selective Channel. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 25–37. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-25-37

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 11.05.2020; accepted 15.06.2020; published online 29.09.2020

Введение. Бурный рост беспроводных телекоммуникационных технологий, связанный с увеличением числа абонентов и расширением предоставляемых сервисов, требует повышения скорости передачи данных. Проблема увеличения пропускной способности, наряду с расширением полосы частот, решается с помощью разнесения и

распределения в пространстве приемных и передающих узлов [1–4]. Одним из направлений повышения эффективности беспроводных систем связи является технология релейных сетей [5–7]. Релейные сети основаны на использовании промежуточных узлов для ретрансляции сигнала от источника к приемнику. Релейные станции осуществляют

прием сигналов от источника, его обработку и передачу к приемнику. Пропускная способность релейных сетей исследуется в работах [7–10].

Для передачи и приема сигналов в релейных сетях используются две основные стратегии. Первая стратегия называется "усиление и передача" (amplify and forward) [7], [9], [11–12], а вторая стратегия предполагает выполнение декодирования/кодирования на релейных станциях [8], [13]. Протокол стратегии "усиление и передача" получил наибольшее распространение, так как он позволяет реализовать потенциальные возможности релейных сетей за счет простейшей обработки сигналов на релейных станциях, предполагающей умножение принятых сигналов на комплексный весовой коэффициент. Развитие этой стратегии представлено в [14–16], где разработаны методы пространственно-временного кодирования сигналов для релейных сетей, позволяющие реализовать возможности пространственно-распределенной системы без знания канальных коэффициентов на релейных узлах. Другим развитием протокола "усиление и передача" является разработка методов обработки сигналов в частотно-селективном канале, основанных на линейной фильтрации [17] и обработке в частотной области [18].

В настоящей статье рассмотрена релейная сеть, работающая по протоколу "усиление и передача" с весовой обработкой на релейных узлах. Проблеме оптимизации распределенной пространственной обработки в релейных сетях посвящен ряд работ [9], [11], [19–20]. Рассмотрены различные критерии оптимизации [11], такие, как критерий минимума суммарной мощности, излучаемой релейными узлами, и критерий максимума отношения сигнал/шум. При этом в первом случае накладывается ограничение на минимальное отношение сигнал/шум в приемнике, а во втором – ограничение на суммарную мощность релейных узлов или на мощность отдельных релейных узлов (индивидуальную мощность).

Оптимизация пространственной обработки на релейных узлах предполагает знание коэффициентов передачи. В [9], [19–20] рассматривалась оптимальная обработка при точном знании канальных коэффициентов. В [11] синтезированы алгоритмы при наличии статистической информации о состоянии канала, содержащейся в матрицах моментов второго порядка. Сравнение двух подходов проведено в [12].

Целью настоящей статьи является исследование спектральной эффективности релейной сети в условиях многолучевого частотно-неселективного канала связи. Рассмотрена оптимальная пространственная обработка сигналов в релейной сети, которая оптимизируется по критерию максимума отношения сигнал/шум при ограничении на полную мощность, излучаемую релейными узлами, и ограничении на индивидуальную мощность релейных узлов. Предполагается наличие априорной информации о состоянии каналов двух типов: точное знание мгновенных значений коэффициентов передачи и знание статистик второго порядка этих коэффициентов.

Первый подход, основанный на знании мгновенных значений канала, требует оценки канальных коэффициентов, что ведет к значительному усложнению системы. Второй подход не требует непрерывной оценки канала, но эффективен только в каналах с высокой пространственной корреляцией. Проведен анализ пропускной способности релейных сетей с мгновенным и статистическим знанием канала с помощью математического моделирования, в результате которого получены средние значения пропускной способности для рассматриваемых методов в каналах с различными статистическими свойствами.

Модель релейной сети. Рассмотрим беспроводную релейную сеть (рис. 1). Она состоит из одного источника, одного получателя сообщения и M промежуточных релейных узлов. Полагаем, что источник не может установить связь напрямую с получателем из-за недостаточного качества канала. По этой причине источник использует релейные узлы для того, чтобы передать информацию получателю. Релейные узлы работают по протоколу "усиление и передача" (amplify and forward) [7], в котором выделяют 2 этапа.

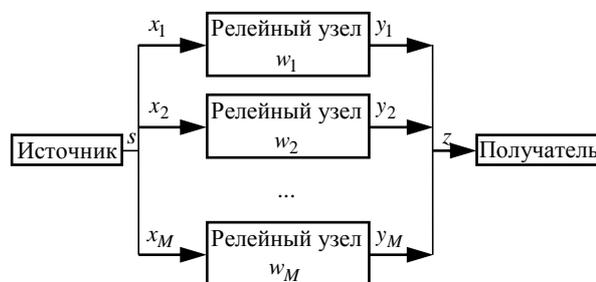


Рис. 1. Схема релейной сети
Fig. 1. Relay network diagram

На первом этапе источник транслирует сигнал $\sqrt{P_0}s$, где P_0 – излучаемая мощность; s – информационный символ.

Пусть средняя мощность информационного символа равна единице: $E\{|s|^2\} = 1$, где $E\{\cdot\}$ – символ математического ожидания. Комплексная амплитуда сигнала, принятого m -м релейным узлом, представляется следующим образом:

$$x_m = \sqrt{P_0}h_m s + v_m, \quad (1)$$

где h_m – комплексный коэффициент передачи канала между источником и m -м релейным узлом; v_m – шум приемника на m -м релейном узле с дисперсией σ^2 . Предположим, что шумы приемных устройств релейных узлов статистически независимы.

На втором этапе релейного протокола m -й релейный узел ретранслирует принятый сигнал, умноженный на комплексный весовой коэффициент w_m :

$$y_m = w_m x_m. \quad (2)$$

В приемном устройстве получателя принятый сигнал представляется в виде суммы сигналов от M релейных узлов:

$$z = \sum_{m=1}^M g_m y_m + v_0, \quad (3)$$

где g_m – коэффициент передачи канала от m -го релейного узла до получателя; v_0 – шум приемного устройства получателя с дисперсией σ_0^2 .

Используя (1) и (2), перепишем (3) следующим образом:

$$z = \sqrt{P_0} \sum_{m=1}^M w_m h_m g_m s + \sum_{m=1}^M w_m g_m v_m + v_0. \quad (4)$$

Первое слагаемое в (4) является сигнальной компонентой, а второе и третье слагаемые представляют суммарный шум релейной сети.

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M]^T$ – вектор коэффициентов передачи первого этапа; $\mathbf{g} = [g_1, g_2, \dots, g_M]^T$ – вектор коэффициентов передачи второго этапа;

$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ – вектор весовых коэффициентов релейных узлов, где "T" – операция транспонирования.

Оптимизация пространственной обработки.

Оптимизация пространственной обработки заключается в выборе весовых коэффициентов, обеспечивающих оптимальное значение целевой функции. Рассмотрим оптимизацию весовых коэффициентов на основе критерия максимума отношения сигнал/шум, при этом необходимыми условиями являются ограничения на мощности релейных узлов. Задача оптимизации пространственной обработки при ограничении суммарной мощности релейных узлов записывается в виде

$$\max_{\mathbf{w}} \eta(\mathbf{w}), P_{\Sigma} \leq P_{\Sigma}^{\max}, \quad (5)$$

где $\eta(\mathbf{w}) = P_s/P_n$ – отношение сигнал/шум; P_{Σ} – средняя суммарная мощность, излучаемая релейными узлами; P_{Σ}^{\max} – бюджет полной мощности, причем P_s – средняя мощность сигнала в приемном устройстве получателя; P_n – средняя суммарная мощность шумов в приемном устройстве получателя.

При ограничении индивидуальных мощностей релейных узлов задача (5) принимает вид

$$\max_{\mathbf{w}} \eta(\mathbf{w}), P_m \leq P_m^{\max}, m = 1, \dots, M, \quad (6)$$

где P_m – средняя мощность, излучаемая m -м релейным узлом; P_m^{\max} – бюджет мощности m -го релейного узла.

Рассмотрим 2 подхода к оптимизации релейной сети, основанных на различном знании априорной информации о канале. В первом подходе предполагается, что информация о канале известна, т. е. известны мгновенные значения коэффициентов передачи канала \mathbf{h} и \mathbf{g} . На практике такое знание может быть получено в результате оценки коэффициентов передачи, что всегда ведет к дополнительным ошибкам. Однако при синтезе оптимальных весовых коэффициентов будем считать, что векторы \mathbf{h} и \mathbf{g} точно известны.

Второй подход предполагает, что мгновенные значения коэффициентов передачи неизвестны, а известны статистики второго порядка – матрицы корреляционных моментов.

Оптимизация со знанием мгновенных значений коэффициентов передачи. Полагаем, что векторы коэффициентов передачи \mathbf{h} и \mathbf{g} известны и являются детерминированными величинами. Тогда получим, что мощности P_s , P_n и P_Σ равны:

$$\begin{aligned} P_s &= P_0 \mathbf{w}^H (\mathbf{h} \otimes \mathbf{g}) (\mathbf{h} \otimes \mathbf{g})^H \mathbf{w}; \\ P_n &= \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{g} \mathbf{g}^H \mathbf{w} + \sigma_0^2; \\ P_\Sigma &= P_0 \mathbf{w}^H \mathbf{h} \mathbf{h}^H \mathbf{w} + \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w}, \end{aligned} \quad (7)$$

где \otimes – символ поэлементного произведения векторов; H – символ эрмитова сопряжения. Введем обозначения:

$$H = P_0 \text{diag} \{ |h_1|^2, |h_2|^2, \dots, |h_M|^2 \} + \sigma I_M$$

– диагональная матрица суммы коэффициентов передачи по мощности первого этапа и корреляционной матрицы шумов релейных узлов; I_M – единичная матрица с размерами $M \times M$; $G = \sigma^2 \mathbf{g} \mathbf{g}^H$ – матрица моментов второго порядка коэффициентов передачи второго этапа; $D = P_0 (\mathbf{h} \otimes \mathbf{g}) (\mathbf{h} \otimes \mathbf{g})^H$ – матрица моментов второго порядка произведений коэффициентов передачи первого и второго этапов. Учитывая (7), оптимизационную задачу (5) можно записать в виде

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^H D \mathbf{w}}{\sigma^2 \mathbf{w}^H G \mathbf{w} + \sigma_0^2}, \quad \mathbf{w}^H H \mathbf{w} \leq P_\Sigma^{\max}. \quad (8)$$

Задача (8) имеет аналитическое решение, которое можно записать как [11]

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= \sqrt{P_\Sigma^{\max}} H^{-0.5} \times \\ &\times \mathcal{P}_{\max} \left\{ \left(\sigma_0^2 I_M + P_\Sigma^{\max} H^{-0.5} G H^{-0.5} \right)^{-1} \times \right. \\ &\quad \left. \times H^{-0.5} D H^{-0.5} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mathcal{P}_{\max} \{ \cdot \}$ – оператор, возвращающий собственный вектор матрицы, которому соответствует максимальное собственное число.

Отметим, что оптимальный весовой вектор обеспечивает когерентное суммирование (по амплитуде) сигнальных составляющих, пришедших от различных релейных узлов, у которых коэффициенты передачи определяются произведением коэффициентов передачи первого и второго этапов.

Шумовые компоненты от различных релейных узлов накапливаются по мощности. В результате реализуется энергетический выигрыш за счет использования релейной сети, который пропорционален числу узлов M .

Алгоритм вычисления весового вектора можно представить в виде последовательности следующих действий:

1. Вычисление матрицы

$$A = \sigma_0^2 I_M + P_\Sigma^{\max} H^{-0.5} G H^{-0.5}.$$

2. Нахождение обратной матрицы A^{-1} .

3. Вычисление матрицы $\tilde{A} = A^{-1} H^{-0.5} D H^{-0.5}$.

4. Нахождение собственного вектора

$$\mathbf{u} = \mathcal{P}_{\max} \{ \tilde{A} \}.$$

5. Вычисление весового вектора

$$\mathbf{w} = \sqrt{P_\Sigma^{\max}} H^{-0.5} \mathbf{u}.$$

Заметим, что шаги 1, 3, 5 состоят из операций матричного умножения, сложения и обращения диагональной матрицы, что не представляет сложностей для практической реализации. Выполнение шага 2 также может быть легко реализовано, если матрицу A^{-1} представить в аналитическом виде:

$$\times \left(I_M - \frac{P_\Sigma^{\max}}{\sigma_0^2 + P_\Sigma^{\max} \sigma^2 \mathbf{g}^H H^{-1} \mathbf{g}} H^{-0.5} G H^{-0.5} \right),$$

вычисление которой заменяет операции на шагах 1, 2.

Наиболее трудоемким для практической реализации представляется вычисление собственного вектора на шаге 4. Однако существует простой и эффективный алгоритм вычисления собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу матрицы, – степенной метод [21]. Это итерационный алгоритм, в котором приближение собственного вектора на j -м шаге вычисляется в виде

$$\mathbf{u}(j) = \frac{\tilde{A} \mathbf{u}(j-1)}{\sqrt{\mathbf{u}^H(j-1) \tilde{A} \mathbf{u}(j-1)}}. \quad (10)$$

Итерационное решение (10) сходится к собственному вектору с максимальным собственным числом матрицы \tilde{A} . В качестве начального приближения $\mathbf{u}(0)$ может быть выбран вектор со случайными компонентами. Таким образом, вычисление весового вектора (9) сводится к последовательности операций умножения и сложения, что не представляет трудностей для практической реализации данного алгоритма.

Рассмотрим решение задачи (6), которую с учетом (7) перепишем в виде

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^H D \mathbf{w}}{\sigma^2 \mathbf{w}^H G \mathbf{w} + \sigma_0^2}, \quad |w_m|^2 H_{m,m} \leq P_m, \quad (11)$$

$$m = 1, \dots, M,$$

где $H_{m,m}$ – (m, m) -й элемент матрицы H .

Задача (11) является невыпуклой, однако она может быть преобразована к квазивыпуклой задаче в соответствии с [11], [22]. Для этого вместо вектора параметров \mathbf{w} введем матрицу $W = \mathbf{w} \mathbf{w}^H$, которая является неотрицательно определенной: $W \succ 0$ [23], а также дополнительную переменную t , отвечающую условию $t \leq (\mathbf{w}^H D \mathbf{w}) (\sigma^2 \mathbf{w}^H G \mathbf{w})^{-1}$. Тогда задачу (11) можно представить как

$$\max_{W, t} t, \quad \text{Tr}\{W(D - tG)\} \geq t\sigma_0^2,$$

$$W \succ 0, \quad W_{m,m} \leq P_m/H_{m,m}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (12)$$

где $\text{Tr}\{\cdot\}$ – след матрицы.

Отметим, что задача (12) не полностью эквивалентна исходной задаче (11), так как в (12) исключена еще одна функция ограничений – ранг матрицы W , являющейся невыпуклой функцией, принят равным единице. Решение задачи (12) ищется на основе метода бисекций [22] с использованием стандартных алгоритмов математического программирования. Все условия задачи (12) являются выпуклыми и линейными относительно W . Поэтому может быть использован линейный поиск переменной t , а именно необходимо найти максимальное значение переменной t , при котором область значений оптимизационной задачи не является пустым множеством. Линейный поиск переменной t осуществляется на интервале $[t_{\min}, t_{\max}]$.

Метод бисекций используется для сокращения перебора по переменной t . При этом на каждой итерации переменной присваивается среднее значение рассматриваемого интервала $t(i) = (t_{\min} + t_{\max})/2$. Далее выполняется проверка условий

$$\text{find } W(i+1), \quad \text{Tr}\{W(D - t(i)G)\} \geq t(i)\sigma_0^2,$$

$$W \succ 0, \quad W_{m,m} \leq P_m/H_{m,m}, \quad m = 1, \dots, M. \quad (13)$$

Задача (13) не имеет целевой функции. Запись $\text{find } W(i+1)$ означает, что в качестве решения $W(i+1)$ находится любая матрица из области значений в (13), отвечающая условиям задачи.

Для нахождения решения задачи (13) используется метод внутренней точки [22]. Вопросы практической реализации алгоритмов выпуклой оптимизации освещены в [24].

Если в (13) область значений – не пустое множество, то $W(i+1)$ присваивается любое допустимое значение из области значений задачи (13), при этом для следующего шага допустимый интервал переменной t ограничивается снизу значением $t_{\min} = (t_{\min} + t_{\max})/2$. В противном случае интервал поиска ограничивается сверху значением $t_{\max} = (t_{\min} + t_{\max})/2$. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока норма разницы двух решений, полученных на успешных итерациях, не станет меньше некоторой малой величины:

$$\|W(i+1) - W(i)\| \leq \delta.$$

Из найденного решения W_* необходимо определить весовой вектор \mathbf{w} . Искомый весовой вектор аппроксимируют с помощью собственного вектора матрицы W_* , который соответствует максимальному собственному числу [25]:

$$\mathbf{w} = \sqrt{\lambda_{\max}\{W_*\}} \mathcal{P}_{\max}\{W_*\}, \quad (14)$$

где $\lambda_{\max}\{\cdot\}$ – оператор, возвращающий максимальное собственное число матрицы. Поиск собственного вектора и соответствующего ему максимального собственного числа осуществляется степенным методом, описанным ранее.

Оптимизация со знанием статистик второго порядка. Будем полагать, что мгновенные значения коэффициентов передачи \mathbf{h} и \mathbf{g} неизвестны.

Если эти коэффициенты являются случайными величинами, то средние значения мощностей P_s , P_n , P_Σ представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} P_s &= \mathbf{w}^H R \mathbf{w}; \\ P_n &= \mathbf{w}^H Q \mathbf{w} + \sigma_0^2; \\ P_\Sigma &= \mathbf{w}^H P \mathbf{w} + \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $R = P_0 E\{(\mathbf{h} \otimes \mathbf{g})(\mathbf{h} \otimes \mathbf{g})^H\}$ – корреляционная матрица произведений коэффициентов передачи первого и второго этапов; $Q = \sigma^2 E\{\mathbf{g}\mathbf{g}^H\}$ – корреляционная матрица коэффициентов передачи второго этапа;

$P = P_0 \text{diag}\{E|h_1|^2, E|h_2|^2, \dots, E|h_M|^2\} + \sigma I_M$ – диагональная матрица суммы средних значений коэффициентов передачи первого этапа по мощности и корреляционной матрицы шумов релейных узлов. Диагональные элементы матрицы P обозначим $P_{1,1}, P_{2,2}, \dots, P_{M,M}$.

Пусть вместо знания коэффициентов передачи известны их статистики второго порядка, а именно матрицы P, R, Q , через которые определяются средние мощности P_s, P_n, P_Σ . Тогда решение задачи (5) записывается аналогично (9):

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= \sqrt{P_\Sigma^{\max} P^{-0.5}} \times \\ &\times P_{\max} \left\{ \left(\sigma_0^2 I_M + P_\Sigma^{\max} P^{-0.5} Q P^{-0.5} \right)^{-1} \times \right. \\ &\left. \times P^{-0.5} R P^{-0.5} \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

Оптимизация с ограничением индивидуальной мощности релейных узлов в соответствии с (6) сводится к решению квазивыпуклой задачи

$$\begin{aligned} \max_{W, t} t, \quad \text{Tr}\{W(R - tQ)\} &\geq t\sigma_0^2, \\ W > 0, \quad W_{m,m} &\leq P_m/P_{m,m}, \quad m = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (17)$$

и нахождению из полученного решения W_* вектора весовых коэффициентов \mathbf{w} аналогично случаю со знанием мгновенных значений коэффициентов передачи.

Практическая реализация алгоритмов поиска оптимальных весовых векторов (16) и (17) полностью аналогична описанному ранее при знании мгновенных значений коэффициентов передачи канала.

Спектральная эффективность релейной сети.

В качестве характеристики спектральной эффективности системы связи будем использовать относительную пропускную способность канала, определяемую по Шеннону и измеряемую количеством бит, передаваемых в секунду в полосе частот 1 Гц. Пропускную способность канала с аддитивным белым гауссовским шумом запишем в виде [2] $C = \log_2(1 + \eta)$, где η – отношение сигнал/шум.

Если коэффициент передачи канала связи является случайным, то среднюю пропускную способность можно записать как [1], [4]

$$C = \int_0^\infty \log_2(1 + \eta) p_\eta(\eta) d\eta,$$

где $p_\eta(\eta)$ – плотность распределения вероятностей отношения сигнал/шум.

Для релейной сети мгновенное значение пропускной способности будет определяться выражением

$$C = 0.5 \log_2 \left(1 + \frac{\mathbf{w}^H D \mathbf{w}}{\sigma^2 \mathbf{w}^H G \mathbf{w} + \sigma_0^2} \right). \quad (18)$$

Отметим, что коэффициент 0.5 учитывает необходимость разделения ресурса канала (по частоте или по времени) для двух этапов передачи в релейной системе. Весовые коэффициенты в (18) могут быть получены как решения оптимизационной задачи (5) или (6) в соответствии с детерминистическим или статистическим подходом к определению мощностей сигналов в релейной сети. Другими словами, для вычисления весовых коэффициентов может использоваться оптимизация со знанием мгновенных значений коэффициентов передачи канала либо оптимизация со знанием их статистических значений. Среднее значение пропускной способности для случайных каналов представим в виде

$$\begin{aligned} C &= 0.5 \int_{\mathbf{h}, \mathbf{g}} \log_2 \left(1 + \frac{\mathbf{w}^H D \mathbf{w}}{\sigma^2 \mathbf{w}^H G \mathbf{w} + \sigma_0^2} \right) \times \\ &\times p_h(\mathbf{h}) p_g(\mathbf{g}) d\mathbf{h} d\mathbf{g}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $p_h(\mathbf{h}), p_g(\mathbf{g})$ – многомерные плотности распределения вероятностей векторов \mathbf{h} и \mathbf{g} соответственно.

Плотность распределения отношения сигнал/шум зависит от модели канала. Однако даже для простых статистических моделей, например модели рэлеевского канала, выводы аналитических выражений крайне затруднительны. В связи с этим наиболее реалистичным подходом для вычисления пропускной способности является математическое моделирование с применением численного интегрирования на основе метода Монте-Карло.

Результаты моделирования. Рассмотрим следующую модель канала. Коэффициенты передачи первого и второго этапов запишем в виде двух слагаемых

$$h_m = \bar{h}_m + \tilde{h}_m; g_m = \bar{g}_m + \tilde{g}_m, m = 1, \dots, M, \quad (20)$$

где символы "–" и "~" указывают на детерминированные и случайные составляющие соответственно.

В каждом статистическом эксперименте составляющие каналов моделируются как комплексные гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием, что соответствует рэлеевской модели канала. Дисперсии для различных составляющих коэффициентов передачи задаются в виде:

$$\begin{aligned} E\{|\bar{h}_m|^2\} &= \frac{1}{1 + \alpha_h}; E\{|\tilde{h}_m|^2\} = \frac{\alpha_h}{1 + \alpha_h}; \\ E\{|\bar{g}_m|^2\} &= \frac{1}{1 + \alpha_g}; E\{|\tilde{g}_m|^2\} = \frac{\alpha_g}{1 + \alpha_g}. \end{aligned} \quad (21)$$

Коэффициенты α_h и α_g определяют соотношения между случайными \tilde{h}_m , \tilde{g}_m и детерминированными составляющими \bar{h}_m , \bar{g}_m коэффициентов передачи каналов. Заметим, что в соответствии с (20), (21) суммарные коэффициенты передачи h_m и g_m имеют дисперсии, равные единице. Также полагаем, что канальные коэффициенты для различных узлов и их составляющие являются статистически независимыми случайными величинами.

Дисперсии собственных шумов в приемных устройствах релейных узлов и в получателе задаются равными единице, т. е. $\sigma^2 = \sigma_0^2 = 1$.

При использовании подхода, основанного на знании мгновенных коэффициентов передачи, предполагается, что коэффициенты h_m , g_m ,

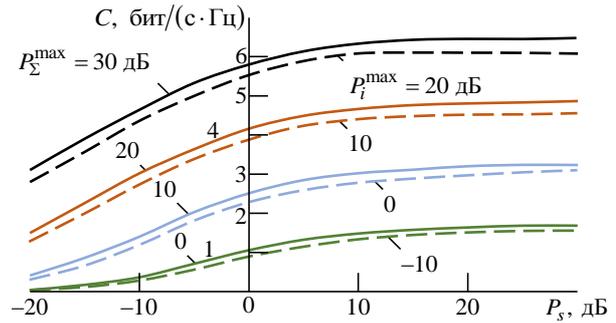


Рис. 2. Зависимости пропускной способности от мощности на источнике при полностью известном канале.

Сплошные линии – ограничение полной мощности; штриховые линии – ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов

Fig. 2. The capacities versus the source power for fully known channel. Solid lines – constraint on full power; dashed lines – constraints on individual powers of relay nodes

$m = 1, \dots, M$ полностью известны для вычисления весового вектора в соответствии с (9) или (14). При использовании второго подхода, основанного на статистическом знании модели канала, будем считать, что \bar{h}_m и \bar{g}_m являются известными составляющими коэффициентов передачи и рассматриваются как математические ожидания в (20), а \tilde{h}_m и \tilde{g}_m – неизвестные случайные составляющие коэффициентов передачи (20). В этом случае, используя независимость случайных составляющих канала, матрицы P , R , Q , через которые определяются мощности в выражении (15), будут представляться в виде

$$\begin{aligned} P &= P_0 \bar{H} + \frac{P_0 \alpha_h}{1 + \alpha_h} I_M + I_M; \\ R &= P_0 (\bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{g}}) (\bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{g}})^H + \\ &+ \frac{P_0 \alpha_h \alpha_g}{(1 + \alpha_h)(1 + \alpha_g)} I_M; \\ Q &= \bar{\mathbf{g}} \bar{\mathbf{g}}^H + \frac{\alpha_g}{1 + \alpha_g} I_M, \end{aligned}$$

где $\bar{H} = \bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H$; $\bar{\mathbf{g}} = [\bar{g}_1, \bar{g}_2, \dots, \bar{g}_M]^T$;
 $\bar{\mathbf{h}} = [\bar{h}_1, \bar{h}_2, \dots, \bar{h}_M]^T$.

Рассмотрим релейную сеть, состоящую из 10 узлов ($M = 10$). Моделирование выполняется в среде MatLab с использованием стандартных средств, а также пакета CVX [26] для решения оптимизационной задачи полуопределенного про-

граммирования. Пропускная способность (19) при определенном наборе параметров вычисляется на основе метода Монте-Карло по 500 статистическим экспериментам, в каждом из которых формируется случайная реализация коэффициентов передачи. Все результаты соответствуют модели рэлеевского канала, которая является адекватной при распространении сигналов в многолучевой рассеивающей среде.

В первом примере, результаты которого приведены на рис. 2 и 3, рассматривается подход, основанный на знании мгновенных коэффициентов передачи канала. На рис. 2 показаны зависимости пропускной способности канала от мощности на источнике P_s . На рисунке представлены 2 семейства кривых. Первое (сплошные линии) – для алгоритма распределения мощности на релейных узлах с ограничением полной мощности, что соответствует оптимальному весовому вектору (9). Показаны зависимости для различных значений полной мощности $P_\Sigma \leq P_\Sigma^{\max} = 0; 10; 20; 30$ дБ, излучаемой релейными узлами. Второе семейство кривых (штриховые линии) соответствует алгоритму ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов, где весовой вектор (14) получен с помощью решения оптимизационной задачи (11). Показаны кривые для $P_m \leq P_m^{\max} = -10; 0; 10; 20$ дБ. При этом, поскольку $P_\Sigma^{\max} = MP_m^{\max}$, бюджеты полной мощности для двух семейств соответствуют друг другу. Таким образом, одинаковыми цветами на рис. 2 показаны кривые для двух различных видов ограничения мощности, определяемых условиями задач (5) и (6) соответственно, но с одинаковым бюджетом полной мощности.

На рис. 3 показаны зависимости пропускной способности от полного бюджета мощности, отнесенного к одному узлу. Аналогично рис. 2 представлены 2 семейства кривых – для оптимизации с ограничением полной мощности (сплошные кривые) и оптимизации с ограничением индивидуальной мощности узла (штриховые кривые). Для второго случая бюджет индивидуальной мощности $P_m^{\max} = P_\Sigma^{\max} / M$. Для каждого из алгоритмов распределения мощности показаны кривые с $P_\Sigma = -10; 0; 20$ дБ.

На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования при наличии только статистической ин-

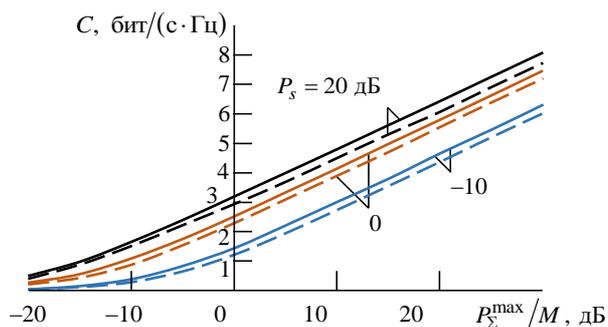


Рис. 3. Зависимости пропускной способности от полного бюджета мощности, отнесенного к одному узлу. Сплошные линии – ограничение полной мощности; штриховые линии – ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов

Fig. 3. The capacities versus the total power budget related to a node. Solid lines – constraint on full power; dashed lines – constraints on individual powers of relay nodes

формации о канале. На этих рисунках представлены 2 семейства кривых. Первое семейство (сплошные кривые) – для алгоритма распределения мощности на релейных узлах с ограничением полной мощности, что соответствует оптимальному весовому вектору (16). Показаны зависимости для значений коэффициента $\alpha = 0; -5; -10$ дБ, а также зависимость для алгоритма с использованием мгновенного знания канала. Второе семейство кривых (штриховые кривые) соответствует алгоритму ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов, где весовой вектор получен с помощью решения оптимизационной задачи (17). Таким образом, одинаковыми маркерами на рис. 4 показаны кривые для двух различных видов ограничения мощности, определяемые условиями задач (5) и (6) соответственно. На рис. 4 показаны зависимости пропускной способности канала от мощности на источнике P_s . При этом бюджет полной мощности $P_\Sigma^{\max} = 10$ дБ. На рис. 5 показаны зависимости пропускной способности от полного бюджета мощности, отнесенного к одному узлу при мощности источника $P_s = 10$ дБ.

Сравнение кривых для разных случаев позволяет сделать следующие выводы. Эффективность пространственной обработки со знанием мгновенных значений всегда выше эффективности обработки, использующей знание статистик второго порядка. Например, при $P_s = 10$, $P_\Sigma^{\max} = 10$ дБ и уровне случайной составляющей $\alpha = -5$ дБ потери в пропускной способности составляют около 25 %, а

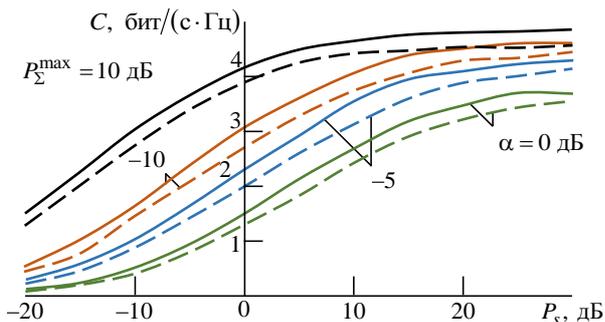


Рис. 4. Зависимости пропускной способности от мощности на источнике при наличии только статистической информации о канале (цветные кривые) и полностью известном канале (черные кривые). Сплошные линии – ограничение полной мощности; штриховые линии – ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов

Fig. 4. the capacities versus the source power for statistical channel information (color curves) and fully known channel (black curves). Solid lines – constraint on full power; dashed lines – constraints on individual powers of relay nodes

при увеличении мощности до $P_s^{\max} = 20$ дБ потери в пропускной способности возрастают до 35 %. Отметим, что при увеличении уровня случайной составляющей эффективность метода, основанного на знании статистик второго порядка, существенно снижается: так, при уровне случайной составляющей $\alpha = 0$ дБ потери в пропускной способности составляют более 50 % при указанных ранее мощностях.

Таким образом, использование статистик второго порядка целесообразно при малых значениях случайной составляющей. На практике это означает, что использование знания статистик второго порядка возможно в релейных сетях, в которых обеспечивается условие прямой видимости с малым уровнем фона от местных предметов. В условиях городской застройки, при которых возникают затенения и многолучевое распространение сигналов, возможно использование только подхода, основанного на знании мгновенного состояния канала.

Заключение. В настоящей статье рассмотрена оптимальная пространственная обработка сигналов в релейной сети, основанная на максимизации выходного отношения сигнал/шум при ограниче-

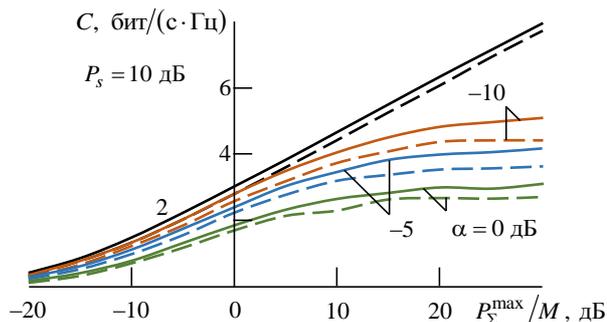


Рис. 5. Зависимости пропускной способности от полного бюджета мощности, отнесенного к одному узлу, при наличии статистической информации о канале (цветные кривые) и при полностью известном канале (черные кривые). Сплошные линии – ограничение полной мощности; штриховые линии – ограничения индивидуальных мощностей релейных узлов

Fig. 5. The capacities versus the total power budget related to a node for statistical channel information (color curves) and fully known channel (black curves). Solid lines – constraint on full power; dashed lines – constraints on individual powers of relay nodes

нии на суммарную или индивидуальную мощность релейных узлов, позволяющая увеличить энергетическое отношение сигнал/шум пропорционально числу релейных узлов. Представлен синтез оптимальных алгоритмов для двух подходов. В первом подходе используется знание мгновенных значений канала, а во втором – только знание статистик второго порядка. Проведено сравнение эффективности оптимальной обработки сигналов для рассматриваемых подходов, представлены результаты моделирования, в котором получены средние значения пропускной способности релейной сети для модели рэлеевского канала.

Показано, что использование статистик второго порядка целесообразно лишь при малых значениях случайной составляющей. На практике это означает, что использование знания статистик второго порядка возможно в релейных сетях, в которых обеспечивается условие прямой видимости с малым уровнем фона от местных предметов. В условиях городской застройки, при которых возникают затенения и многолучевое распространение сигналов, возможно использование только подхода, основанного на знании мгновенного состояния канала.

Список литературы

1. Telatar I. E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels // Eur. Trans. Telecommun. 1999. Vol. 10, № 6. P. 585–595. doi: 10.1002/ett.4460100604
2. Foschini G. J., Gans M. J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when using Multiple Antennas // Wireless Personal Communications. 1998.

- Vol. 6, № 3. P. 311–335. doi: 10.1023/A:1008889222784
3. Gupta P., Kumar P. R. The Capacity of Wireless Networks // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2002. Vol. 46, № 2. P. 388–404. doi: 10.1109/18.825799
4. Capacity Limits of MIMO Channels / A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath // IEEE J. on Selected

- Areas in Communication. 2003. Vol. 21, № 5. P. 684–702. doi: 10.1109/JSAC.2003.810294
5. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. User Cooperation Diversity. Pt. I: System description // IEEE Trans. on Commun. 2003. Vol. 51, № 11. P. 1927–1938. doi: 10.1109/TCOMM.2003.818096
6. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. User Cooperation Diversity. Pt. II: Implementation Aspects and Performance Analysis // IEEE Trans. on Commun. 2003. Vol. 51, № 11. P. 1939–1948. doi: 10.1109/TCOMM.2003.819238
7. Laneman J., Tse D., Wornell G. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2004. Vol. 50, № 12. P. 3062–3080. doi: 10.1109/TIT.2004.838089
8. Kramer G., Gastpar M., Gupta P. Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2005. Vol. 51, № 9. P. 3037–3063. doi: 10.1109/TIT.2005.853304
9. Capacity Scaling Laws in MIMO Relay Networks / H. Bolcskei, R. U. Nabar, O. Oyman, A. J. Paulraj // IEEE Trans. on Wireless Commun. 2006. Vol. 5, № 6. P. 1433–1444. doi: 10.1109/TWC.2006.1638664
10. Gastpar M., Vetterli M. On the Capacity of Wireless Networks: The Relay Case // Proc. 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, USA, 23–27 June 2002. Vol. 3. P. 1577–1586. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019409
11. Distributed Beamforming for Relay Networks based on Second-Order Statistics of the Channel State Information / V. Havary-Nassab, S. Shahbazpanahi, A. Grami, Z.-Q. Luo // IEEE Trans. on Signal Processing. 2008. Vol. 56, № 9. P. 4306–4316. doi: 10.1109/TSP.2008.925945
12. Данилов А. А., Маврычев Е. А. Эффективность оптимизации пространственной обработки сигналов в релейных сетях с априорной информацией о канале // Докл. V Всерос. конф. "Радиолокация и связь", Москва, 21–25 нояб. 2011 г. С. 421–426.
13. Coded Cooperation in Wireless Communications: Space-Time Transmission and Iterative Decoding / M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, A. Nosratinia // IEEE Trans. on Signal Process. 2004. Vol. 52, № 2. P. 362–371. doi: 10.1109/TSP.2003.821100
14. Laneman J. N., Wornell G. W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless network // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2003. Vol. 49. P. 2415–2425. doi: 10.1109/GLOCOM.2002.1188045
15. Jing Y., Hassibi B. Distributed space-time coding in wireless relay networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2006. Vol. 5, № 12. P. 3524–3536. doi: 10.1109/TWC.2006.256975
16. Jing Y., Jafarkhani H. Using Orthogonal and Quasi-Orthogonal Designs in Wireless Relay Networks // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2007. Vol. 53, № 11. P. 4106–4118. doi: 10.1109/TIT.2007.907516
17. Chen H., Gershman A. B., Shahbazpanahi S. Filter-and-Forward Distributed Beamforming in Relay Networks With Frequency Selective Fading // IEEE Trans. on Signal Process. 2010. Vol. 58, № 3. P. 1251–1262. doi: 10.1109/TSP.2009.2035986
18. Zhang W., Mitra U., Chiang M. Optimization of Amplify-and-Forward Multicarrier Two-Hop Transmission // IEEE Trans. on Communications. 2011. Vol. 59, № 5. P. 1434–1445. doi: 10.1109/TCOMM.2011.022811.100017
19. Nabar R. U., Bolcskei H., Kneubuhler F. W. Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design // IEEE J. on Selected Areas in Communication. 2004. Vol. 22, № 6. P. 1099–1109. doi: 10.1109/JSAC.2004.830922
20. Jing Y., Jafarkhani H. Network Beamforming Using Relays with Perfect Channel Information // IEEE Trans. on Inform. Theory. 2009. Vol. 55, № 6. P. 2499–2517. doi: 10.1109/TIT.2009.2018175
21. Scaglione A., Pagliari R., Krim H. The Decentralized Estimation of the Sample Covariance // 42nd Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA. Pacific Grove, USA, 26–29 Oct. 2008. P. 1722–1726. doi: 10.1109/ACSSC.2008.5074720
22. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 722 p. doi: 10.1017/CBO9780511804441
23. Воеводин В. В. Линейная алгебра: учеб. пособие. 4-е изд. СПб.: Лань, 2008. 416 с.
24. Mattingley J., Boyd S. Real-Time Convex Optimization in Signal Processing // IEEE Signal Processing Magazine. 2010. Vol. 27, № 3. P. 50–61. doi: 10.1109/MSP.2010.936020
25. Semidefinite Relaxation of Quadratic Optimization Problems / Z.-Q. Luo, W.-K. Ma, A. M.-C. So, Y. Ye, S. Zhang // IEEE Signal Processing Magazine. 2010. Vol. 27, № 3. P. 20–34. doi: 10.1109/MSP.2010.936019
26. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming. Ver. 2.2 / CVX Research. URL: <http://cvxr.com/cvx/> (дата обращения 22.06.2020)

Информация об авторах

Маврычев Евгений Александрович – кандидат технических наук (2003), доцент (2012) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая обработка сигналов и ее применение в радиосвязи и радиолокации, теория обнаружения и оценивания, адаптивная обработка сигналов, обработка данных в сетях, машинное обучение.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Н. Новгород, 603950, Россия

E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>

Приблудова Елена Николаевна – кандидат технических наук (2000), доцент (2002) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка радиолокационных сигналов, адаптивная обработка сигналов, языки программирования.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Н. Новгород, 603950, Россия
E-mail: pribludova@nntu.ru

Сидоров Сергей Борисович – кандидат технических наук (2000), доцент (2002) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, траекторная обработка в радиолокации, системное программирование.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Н. Новгород, 603950, Россия
E-mail: sidorov@nntu.ru

References

1. Telatar I. E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *Eur. Trans. Telecommun.* 1999, vol. 10, no. 6, pp. 585–595. doi: 10.1002/ett.4460100604
2. Foschini G. J., Gans M. J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when using Multiple Antennas. *Wireless Personal Communications.* 1998, vol. 6, no. 3, pp. 311–335. doi: 10.1023/A:1008889222784
3. Gupta P., Kumar P. R. The Capacity of Wireless Networks. *IEEE Trans. on Inform. Theory.* 2002, vol. 46, no. 2, pp. 388–404. doi: 10.1109/18.825799
4. Goldsmith A., Jafar S. A., Jindal N., Vishwanath S. Capacity Limits of MIMO Channels. *IEEE J. on Selected Areas in Commun.* 2003, vol. 21, no. 5, pp. 684–702. doi: 10.1109/JNSAC.2003.810294
5. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. User Cooperation Diversity. Pt. I. System description. *IEEE Trans. on Commun.* 2003, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938. doi: 10.1109/TCOMM.2003.818096
6. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. User Cooperation Diversity. Pt. II. Implementation Aspects and Performance Analysis. *IEEE Trans. on Commun.* 2003, vol. 51, no. 11, pp. 1939–1948. doi: 10.1109/TCOMM.2003.819238
7. Laneman J., Tse D., Wornell G. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. *IEEE Trans. on Inform. Theory.* 2004, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080. doi: 10.1109/TIT.2004.838089
8. Kramer G., Gastpar M., Gupta P. Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks. *IEEE Trans. on Inform. Theory.* 2005, vol. 51, no. 9, pp. 3037–3063. doi: 10.1109/TIT.2005.853304
9. Bolcskei H., Nabar R. U., Oyman O., Paulraj A. J. Capacity Scaling Laws in MIMO Relay Networks. *IEEE Trans. on Wireless Commun.* 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1433–1444. doi: 10.1109/TWC.2006.1638664
10. Gastpar M., Vetterli M. On the Capacity of Wireless Networks: The Relay Case. *Proc. 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies.* New York, USA, 23–27 June 2002, vol. 3, pp. 1577–1586. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019409
11. Havary-Nassab V., Shahbazpanahi S., Grami A., Luo Z.-Q. Distributed Beamforming for Relay Networks based on Second-Order Statistics of the Channel State Information. *IEEE Trans. on Signal Processing.* 2008, vol. 56, no. 9, pp. 4306–4316. doi: 10.1109/TSP.2008.925945
12. Danilov A. A., Mavrychev E. A. Efficiency of optimization of spatial signal processing in relay networks with a priori channel information. *Rep. of the V all-Rus. Conf. "Radar and communications"*, Moscow, 21–25 Nov. 2011, pp. 421–426. (In Russ.)
13. Janani M., Hedayat A., Hunter T. E., Nosratinia A. Coded Cooperation in Wireless Communications: Space-Time Transmission and Iterative Decoding. *IEEE Trans. on Signal Process.* 2004, vol. 52, no. 2, pp. 362–371. doi: 10.1109/TSP.2003.821100
14. Laneman J. N., Wornell G. W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless network. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Oct. 2003, vol. 49, pp. 2415–2425. doi: 10.1109/GLOCOM.2002.1188045
15. Jing Y., Hassibi B. Distributed space-time coding in wireless relay networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2006, vol. 5, no. 12, pp. 3524–3536. doi: 10.1109/TWC.2006.256975
16. Jing Y., Jafarkhani H. Using Orthogonal and Quasi-Orthogonal Designs in Wireless Relay Networks. *IEEE Trans. on Inform. Theory.* 2007, vol. 53, no. 11, pp. 4106–4118. doi: 10.1109/TIT.2007.907516
17. Chen H., Gershman A. B., Shahbazpanahi S. Filter-and-Forward Distributed Beamforming in Relay Networks With Frequency Selective Fading. *IEEE Trans. on Signal Process.* 2010, vol. 58, no. 3, pp. 1251–1262. doi: 10.1109/TSP.2009.2035986
18. Zhang W., Mitra U., Chiang M. Optimization of Amplify-and-Forward Multicarrier Two-Hop Transmission. *IEEE Trans. on Commun.* 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1434–1445. doi: 10.1109/TCOMM.2011.022811.100017
19. Nabar R. U., Bolcskei H., Kneubuhler F. W. Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design. *IEEE J. on Selected Areas in Commun.* 2004, vol. 22, no. 6, pp. 1099–1109. doi: 10.1109/JNSAC.2004.830922

20. Jing Y., Jafarkhani H. Network Beamforming Using Relays with Perfect Channel Information. IEEE Trans. on Inform. Theory. 2009, vol. 55, no. 6, pp. 2499–2517. doi: 10.1109/TIT.2009.2018175

21. Scaglione A., Pagliari R., Krim H. The Decentralized Estimation of the Sample Covariance. 42nd Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA. Pacific Grove, USA, 26–29 Oct. 2008, pp. 1722–1726. doi: 10.1109/ACSSC.2008.5074720

22. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2004. 722 p. doi: 10.1017/CBO9780511804441

23. Voevodin V. V. *Linejnaya algebra* [Linear algebra]. Textbook. 4th ed. Saint Petersburg. *Izd-vo LAN*; 2008, 416 p.

24. Mattingley J., Boyd S. Real-Time Convex Optimization in Signal Processing. IEEE Signal Processing Magazine. 2010, vol. 27, no. 3, pp. 50–61. doi: 10.1109/MSP.2010.936020

25. Luo Z.-Q., Ma W.-K., So A. M.-C., Ye Y., Zhang S. Semidefinite Relaxation of Quadratic Optimization Problems. IEEE Signal Processing Magazine. 2010, vol. 27, no. 3, pp. 20–34. doi: 10.1109/MSP.2010.936019

26. CVX Research. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming. Ver. 2.2. Available at: <http://cvxr.com/cvx/> (accessed 22.06.2020)

Information about the authors

Evgeny A. Mavrychev, Cand. Sci. (Eng.) (2003), Associate Professor (2012) on the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. His is author more than 70 scientific papers. Area of expertise: statistical signal processing and its application in communications and radar, detection and estimation theory, adaptive signal processing, data processing in networks, machine learning.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 24, Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>

Elena N. Pribludova, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2002) on the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. His is author more than 90 scientific papers. Area of expertise: space-time radar signal processing, adaptive signal processing, programming languages.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 24, Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: pribludova@nntu.ru

Sergey B. Sidorov, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2002) on the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. His is author more than 30 scientific papers. Area of expertise: digital signal processing, forward scattering radar target tracking, system programming.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 24, Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: sidorov@nntu.ru

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Materials and Organic Semiconductors in Photovoltaic Devices

Andrey Kosarev¹, Ismael Cosme², Svetlana Mansurova¹, Dmitriy Andronikov^{3,4},
Alexey Abramov^{3,4}, Igor Shakhray^{5,6}, Eugeny Terukov^{3,4,6}✉

¹ National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE), Puebla, Mexico

² CONACyT-INAOE, Puebla, Mexico

³ R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics LLC, (RDC TFTE), St Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Physics and technical Institute, St Petersburg, Russia

⁵ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St Petersburg, Russia

⁶ Hevel LLC, Novocheboksarsk, Russia

✉ eug.terukov@mail.ioffe.ru

Abstract

Introduction. PECVD enables fabrication of wide range of advanced materials with various structure such as amorphous, polymorphous, nano-crystalline, nanostructured, microcrystalline etc. and with various electronic properties. The latter can be also changed by different doping. PECVD silicon materials are commercially employed in multi-layered PV structures (including ones on flexible substrates). Combining these materials with crystalline silicon active substrate resulted in significant improvement of PCE in hetero junction technology PV structures. Existence of new organic semiconductors (OS) together with understanding of physical properties resulted in fast development of OC PV devices

Aim. To consider both PECVD and OS materials and to present description of fabrication, structure and electronic properties for device application.

Materials and methods. Devices based on non-crystalline materials, devices based on OS, hybrid devices. PECVD and Spin coating technique was used to deposit materials with tunable properties enabling device engineering possibilities.

Results. PECVD and OS materials were analyzed. These materials have different levels of characterization (data volume, interpretation of the results etc.) and of understanding of physics determining device performance. Some examples of these materials in PV including structures with crystalline silicon were considered.

Conclusion. Important advantage of both PECVD and OS materials is that fabrication methods are compatible and allow fabrication of great variety of hybrid device structures on crystalline semiconductors. Advantages of such devices are difficult to predict because of lack of data in scientific literature. However a new area in material science and related devices for further exploring and exploiting has appeared.

Keywords: PECVD materials, plasma deposition, organic semiconductors, photovoltaic devices, hybrid photovoltaic devices

For citation: Kosarev A., Cosme I., Mansurova S., Andronikov D., Abramov A., Shakhray I., Terukov Eu. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Materials and Organic Semiconductors in Photovoltaic Devices. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 38–47. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-38-47

Acknowledgements. The authors would like greatly appreciate Dr.Y.Kudriavtsev (CINVESTV, Mexico) for many years of collaboration in application of advanced SIMS techniques to study non-crystalline materials, We would like to thank our PhD students Hiram Martinez (Electronics department of INAOE), Antonio J. Olivares-Vargas (Optics department of INAOE) for their dedication to work with both PECVD and organic semiconductors for PV devices and possibility to use their data, also many thanks to engineer Adrian Itzmoyotl for his technical service during fabrication of materials and devices.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 06.05.2020; accepted 15.06.2020; published online 29.09.2020

© Kosarev A., Cosme I., Mansurova S., Andronikov D., Abramov A., Shakhray I., Terukov Eu.



Introduction. Crystalline semiconductors are principal materials for devices in modern solid-state electronics. Their fabrication technology, structure and electronic properties have been extensively studied for years and well reported in literature. Recently new classes materials have appeared, however, and resulted in new types of devices, which are not possible to realize with crystalline semiconductors. One such class of materials is materials (thin films) prepared by means of plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) and another is class of organic semiconductors (OS). Logically this classification is not accurate because PECVD materials are defined by fabrication method, while OS are defined by chemical structure. Nevertheless, we use further this classification and notification for materials because it is convenient, and these terms are known for specialists and widely used in literature.

Both classes present artificial (human created) materials in contrast to crystalline semiconductors. They have very significant advantages versus crystalline semiconductors:

- a) structure of them and consequently electronic properties can be varied in very wide range not limited by bond length (angles) and stoichiometry constrains providing impressive possibilities for material engineering;
- b) they are fabricated by low temperature technology compatible with crystalline semiconductors enabling also substrates made of glass, plastics, metal foils etc. which could be also flexible;
- c) these materials can be used for large area devices. PECVD is rather mature technology and PECVD materials are commercially used in such important devices as displays and solar cells, while OS technology is only at initial stage of commercialization.

Nevertheless, it is important that they both can be realized by industrial methods, which allow scaling up device production.

In this paper we consider both PECVD and OS materials and present a brief description of fabrication, structure and electronic properties principal for device applications.

Variation of technological parameters during fabrication of these materials results in significant and well controlled changes in electronic properties providing a great promise for material and device engineering. Additionally technological compatibility of them allows design and development of hybrid device structures comprising both PECVD and OS materials. We shall use mostly our results for illustration and will avoid extended discussion due to space constraints.

Experimental.

Fabrication of PECVD Materials. Chemical vapour deposition (CVD) is well developed technique based on thermal decomposition of gases resulting in formation of radicals (partly decomposed molecules with unsaturated chemical bonds) and consequent film growth on a substrate. In order to have reasonable growth rate substrate temperature should be sufficiently high in the range of 600–1000 °C making impossible to use such substrate as glass. Radicals are principal components for the film growth and are created by only collisions of molecules with sufficiently high kinetic energy, which number depends on temperature and even at high temperature is still not large. Alternatively, plasma of glow discharge can be used for creating radicals. This technique is known as plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). In this case a reactor can be designed either for inductive or capacitive type of discharge. The latter is conventionally used in both laboratory and industrial equipment.

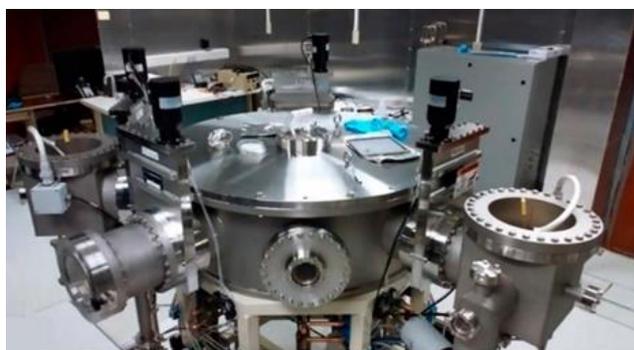
It is known that neutrals (molecules, radicals, atoms) and charged (ions and electrons) particles existing plasma. The charged particles are sensitive to electric field applied to the capacitive electrodes to create the discharge. Both ions and electrons are accelerated in electric field before collisions, but electrons because of lighter mass gain more velocity and kinetic energy from electric field. Concentrations of charged particles in glow discharge plasma are significantly (by factor of 10^3 – 10^4) less than those of neutrals therefore probability of collisions for charged particles are determined by (electron, ion)-(neutrals) interactions. Between collisions both ion and electron move with acceleration determined by electric field. For the same time of travelling ion velocity increase (consequently increase of kinetic energy) is significantly less (due to mass difference) than that of electron. Dominating collision ion with neutral atom results in effective transfer of kinetic energy gained by ion to neutral thus gas temperature slightly increases. Behavior of electron is significantly different: after 1st acceleration it cannot transfer the gained energy to neutral (because of mass difference) and continues its travel gaining kinetic energy until inelastic collision when it transfers its kinetic energy into internal one (e.g. in ionization process or breaking chemical bond, or exciting core electrons in atom etc.).

Electrical field in discharge results in little increase of gas temperature. While behavior of elec-

trons have principal difference related to significantly less (by factor of 1800) electron mass. Electron practically doesn't lose its kinetic energy in elastic collisions with heavy particles (neutrals and ions), and after a series collisions, an electron continues to increase its kinetic energy, reaching its mean value ("electron" temperature) in the range of 2...10 eV. Thus, electrons in glow discharge have mean energy enough to break any molecular bond creating radicals. That is why substrate temperature is not of principal importance in PECVD technique. Substrate temperature in PECVD fabrication is in the range of RT – 300 °C, making possible deposition of materials on glass, metal or plastic foils. The latter paves way for flexible large area electronics.

Electric field in PECVD system is formed by application of DC, AC, RF or VHF voltage from power source. RF discharge is mostly used. At present PECVD technique allows fabrication of devices of square meters area (record seems to belong to "Applied Materials" – 5.2 m²). For the first time continuous multilayered (about 20 layers) device fabrication has been realized by PECVD roll-to-roll deposition on stainless steel foil by "UNI Solar" [3]. PECVD technique is of principal importance (dominating in the multibillion markets of displays) for fabrication large area displays and occupies significant segment in PV devices. The most important advantages of PECVD are related to facilities for material engineering (creation of artificial materials with controlled structure and electronic properties) and to continuous (or large scale) fabrication of large area devices. Fig. 1 shows PECVD installations:

a) for laboratory research with sample area up to 150 × 150 mm (from "MVS Inc." USA, located at INAOE, Puebla, Mexico);



a

b) for industrial scale experiments with sample area to 1000 × 1200 mm (KAI-1200 from "Oerlikon", Switzerland, located at RDC TFTE, St Petersburg, Russian Federation).

Laboratory installations conventionally comprise several chambers ("multi-chamber cluster tool") including load-lock and transport chamber that allows fabrication of multi-layered structures avoiding cross and ambient contaminations. Large area systems are usually used in modelling processes and prototyping device structures for consequent implementation of the results obtained in some large-scale production facilities.

Fabrication of organic materials. The biggest advantage of organic materials based on polymer is their solution type fabrication processes. In comparison to inorganic material deposition methods, which usually require high substrate temperature and complex high vacuum process, organic materials deposition requires only a neutral atmosphere to reduce ambient contamination that is usually obtained by nitrogen ambient in glovebox systems. Deposition techniques for semiconductor and conductor polymers can be divided in:

1) coating process (spin coating, blade coating, spray coating, etc.);

2) printing process (screen, offset and inkjet printing) [1].

Spin coating system seems to be dominating technique to deposit organic materials in research laboratories because of its "simplicity". However, other methods enabling printing are being developed to reach industrial scale such as screen or inkjet printing for deposition on flexible substrates and large areas.

Electronic properties of organic material thin films depend on the deposition process conditions determined by such factors as viscosity, diffusivity, volatility and dilution method used to prepare the initial



b

Fig. 1. Photo images of PECVD systems: a – laboratory level multi-chambered cluster tool ("MVSyst. Inc.", USA, located at INAOE, Puebla, Mex.); b – system for industrial scale experimenting ("Oerlikon, Switzerland", located at TF TE RC)

chemical solution. Despite the flexibility of fabrication process of organic materials, it has not been found the "best" technique that dominates industry preferences.

Results for devices

Devices based on PECVD materials. Possibility of doping in PECVD films pioneered by P. Le Comber, W. Spear [2] resulted in development of PV devices firstly with Schottky barrier then with p–i–n junctions. Most developed devices are triple junction from "Uni-Solar" [3] and "micromorph" [4].

Let us consider two representatives of PV devices based on PECVD materials. The first is triple tandem fabricated by means of roll-to-roll process on stainless steel substrate. The structure and the fabrication technology have been developed by "Uni Solar" [3]. It comprises 9 PECVD semiconductor layers forming 3 serially connected p–i–n junctions with a-SiH and a-SiGe:H as intrinsic semiconductors, semi-transparent frontal electrode (made of indium tin oxide ITO), conducting grid electrode to improve current collection and some additional layers. Three p–i–n junctions are formed with specially developed intrinsic a-Si:H, a-SiGe:H films with optical gaps and thicknesses of the films designed to optimize optical absorption in a wider wavelength range than that is for one semiconductor thus improving photon absorption and photo-carrier collection. The optimization also includes adjustment of absorption and thicknesses in such way that each p–i–n junction collecting its part of solar spectra should generate the same current otherwise mismatching would create losses and reducing efficiency. The best power conversion efficiency (PCE) achieved (certified) was PCE = 13 % [3] for module area about 1 m².

Another PV structure developed for commercial application is called "micromorph" structure [4]. The structure comprises two PECVD p–i–n junctions with amorphous a-Si:H and microcrystalline silicon mk-Si:H. Because of difference in optical band gap ($E_g = 1.75$ eV for a-Si:H and $E_g = 1.1$ eV for mk-Si:H) the structure provides collection of both visible part of spectra and substantial part of NIR spectrum resulting in increase of photocurrent and efficiency. In micromorph devices, optical optimization of frontal part and rear contact has been applied for effective light trapping and better harvesting penetrated photons. The micromorph structures have been reported with double (one junction with mk-Si:H) and triple (two junctions with mk-Si:H) junctions with stabilized efficiency 11.2 % and 12 %, respectively [4].

Devices based on organic materials. Organic photovoltaic (OPV) solar cell based on solvable compounds, predominantly polymers but most recently also small molecules are increasingly being investigated. This technology promises theoretically low-cost printable PV devices on flexible substrates.

The main difference in function between organic and inorganic active layer is related to creation of rather stable exciton by absorbed photon in organic molecular or polymer absorber in organic photovoltaic (OPV) device. The diffusion length of excitons is typically the order of 10 nm, i. e. around tenth of the thickness of the active layer required to absorb significant proportion of the incident light. As a result, the majority of the photo-generated excitons in a sandwich OPV device decays (recombines) before their collection and does not contribute into current in an external circuit [5, 6]. In order to separate charges of exciton converting them in mobile ones the fundamental bulk. As a heterojunction (BHJ) concept has been developed. It involves organic material composition with the self-assembly of nanoscale heterojunctions (micro heterojunctions) created by spontaneous phase separation of the donor-like (polymer) and acceptor-like (e. g. fullerene) components. Because of this spontaneous phase separation, charge – separating nano-scaled hetero-junctions are formed throughout the bulk of the active layer. In other words the charges of the excitons with small diffusion lengths are separated by the local electric fields of the micro heterojunctions. This mechanism provides separation of charges (dissociation) of exciton and appearance of mobile charge carriers. However, external electric field for transportation of the separated charges is required and provided by two electrodes with different work function.

After the introduction of the BHJ concept, pioneering researchers started to recognize the importance of precise control of morphology because the device performance is extremely sensitive to the nano morphology of the BHJ film induced by spontaneous phase separation of the D:A blends [7–9]. A variety of processing techniques, such as thermal/solvent annealing and processing additives, [10–12] have been devised, and those attempts have enabled us rather fine-tuning 3D nanostructured BHJ morphologies. For further optimization of organic semiconductors, research interests have moved to interface engineering, i. e., inserting interfacial layers (IFLs) between the BHJ film and the electrodes [13–17]. By developing new organic/inorganic interfacial materials or

introducing already developed materials used in other research fields, substantial studies have demonstrated that those materials function as charge-transporting/blocking layers, surface modifiers, and optical spacers, which increase the conversion efficiency of devices with organic semiconductors. More significant advances have been achieved by developing new device architectures [18–22]. For example, multi-junction structures, in which two or more sub-cells with different absorption regions are vertically stacked and interconnected in series or parallel, have allowed a broad solar spectrum to be harvested. Furthermore, the development of various donor materials with different bandgaps and fullerene/non-fullerene acceptors has also been devoted to substantially improving the efficiency of devices with organic semiconductors [23–28]. The combination of new material designs/syntheses and the previously mentioned methods have led to remarkable efficiency enhancements, reaching values over PCE > 11 % [22, 29]. Considering that BHJ organic semiconductors have impressive advantages, such as low-cost printability and extreme mechanical flexibility, when compared to those of amorphous silicon solar cells, the efficiency PCE > 11 % represents an acceptable efficiency level for flexible solar cells and further commercialization of devices with organic semiconductors [30].

Hybrid devices based on PECVD-Polymer materials. Organic-inorganic hybrid solar cells are an alternative to pure organic or inorganic PV devices. Fig. 2 shows an example of a new concept of hybrid photovoltaic structure based on a-Si:H and Polymer organic conductor ITO/ PEDOT:PSS/ (i) a-Si:H/ (n) a-Si:H. Structure was fabricated on Indium Tin Oxide (ITO)

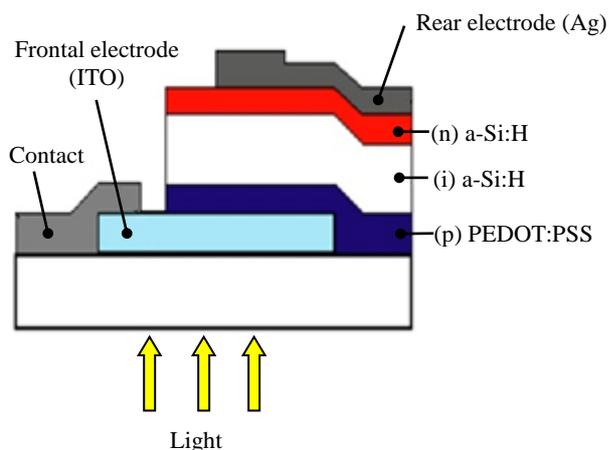


Fig. 2. Hybrid photovoltaic structure based on a-Si:H and Polymer organic conductor ITO/ PEDOT:PSS/ (i) a-Si:H/ (n) a-Si:H. PEDOT:PSS film deposited by spin coating (45 nm) 45 μ L. Inorganic layers deposited by multi chamber PECVD system with RF PECVD

coated glass substrates. PEDOT:PSS precursor was prepared with 1:6 weight ratio. Mixed solution was filtered with a PVDF filter with pore sizes of 0.45 μ m. The PEDOT:PSS layer was deposited in N₂ ambient by spin coating. The PEDOT:PSS films with thickness of 45 nm was obtained from 45 μ L of solution deposited at rotation speed of 2500 rpm. Inorganic layers were deposited using a cluster multi chamber PECVD system with RF discharge at frequency $f = 13.56$ MHz. The intrinsic a-Si:H layer was deposited from an 10 % SiH₄ + 90 % H₂ gas mixture at pressure $P = 550$ mTorr. The 20 nm thick n-layers were deposited using 0.01 % PH₃ + 9.9 % SiH₄ + 90.09 % H₂ gas mixtures at pressure $P = 550$ mTorr. Finally, the 6 nm thick p-layer was deposited using the 0.26 % B₂H₆ + 21 % CH₄ + 53 % SiH₄ + 25.74 % H₂ mixture at pressure $P = 690$ mTorr. The deposition temperature was fixed at $T_d = 160$ °C and power at $W = 3$ Watt. The deposition of the top contacts was performed by sputtering of Ag through a metal shadow mask with an area of 0.09 cm².

The cross-section scanning electron microscopy (SEM) image (in secondary electron regime) of the hybrid photovoltaic structure on flexible substrate is shown in Fig. 3. AZO layer has columnar structure and PEDOT:PSS layer, deposited on AZO is rather inhomogeneous at the PEDOT:PSS/a-Si interface. However, PEDOT layer "heals" rather rough AZO surface, preparing smooth and planar surface for the deposition of amorphous silicon film. It is interesting to note, that the substrate defect (crack) is translated through the AZO layer and this is interrupted due to the organic polymer layer.

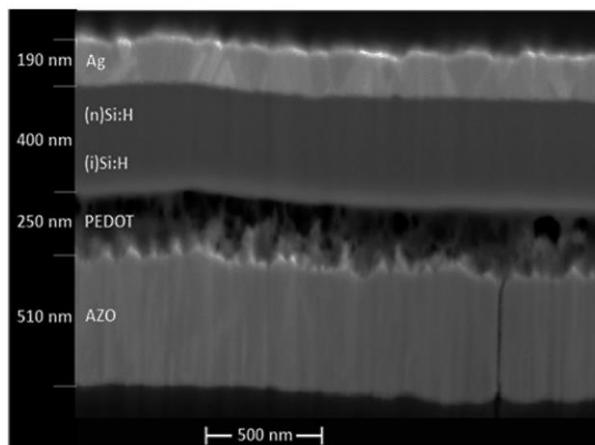


Fig. 3. Cross-section scanning electron microscopy (SEM) image (from secondary electron regime) of the hybrid photovoltaic structure on flexible substrate (PEN/AZO/PEDOT:PSS/ (i) a-Si:H/ (n) a-Si:H/Ag stack)

The electronic characteristics of PEDOT:PSS can be modified by dilution method. Thus, performance characteristics of devices can be control by modification of PEDOT:PSS film. Fig. 4 shows the $J(V)$ characteristics and performance characteristics (V_{oc} and J_{sc}) of hybrid ITO/PEDOT:PSS/(i) a-Si:H/(n) a-Si:H photovoltaic (PV) structures incorporating the post-deposition isopropanol (IPA) dipped PEDOT:PSS films. Structure with PEDOT:PSS film with 45 min of IPA dipping time showed the best performance with $J_{sc} = 15.29 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0.61 \text{ V}$, $FF = 36.5 \%$ and $PCE = 3.40 \%$. Fig. 4, *b* displays the values of J_{sc} and V_{oc} for untreated and IPA dipped samples as function of dipping time. The values of J_{sc} show an increase from 9.52 mA/cm^2 for the untreated PEDOT:PSS structure to 15 mA/cm^2 for the IPA dipped PEDOT:PSS structure with 45 dipping time, this may be due to the decrease of the resistivity of their IPA dipped PEDOT:PSS films. It is interesting to note some the maximum values such as $J_{sc} \sim 15 \text{ mA/cm}^2$ obtained in these structures. The values are very similar to those in the best p–i–n structures based on a-Si:H or even better [17]. However, the shunt and serial resistances in the PEDOT:PSS/(i) a-Si:H structures are the main issue to be solved in order to increase the FF values above 50 %. The substitution of the p-type a-Si:H:B by a PEDOT:PSS layer results in improvement of frontal interface properties and simplification of fabrication process of p–i–n structures based on amorphous silicon.

Hybrid devices using crystalline semiconductors, non-crystalline PECVD and organic materials (HJTOS structures). Combination of well-developed crystalline silicon (c-Si) solar cell with PECVD

layers has provided substantial improvement in efficiency from 17 to 24 % [31]. The structure is notified as hetero-junction transitions (HJT) structure. Therefore, in this section we consider an example of such HJT device structure comprising both crystalline semiconductor and PECVD layers schematically shown in Fig. 5, *a*.

The base of the structure is n-doped c-Si wafer. On the top of the wafer intrinsic a-Si_xC_{1-x}H film (with optimized x), then intrinsic a-Si:H film are deposited. Above that it is p-doped microcrystalline silicon and then transparent conductive oxide (ITO) covered finally with electrode grid. Thus some junctions:

a) between p-mk-Si:H and a-Si:H film;

b) between a-Si:H and c-Si (because of optical gap difference) are created forming electric field on frontal side that improves collection of charge carriers generated by short wavelength photons.

On the rare (back) side a-Si:H and n-doped mk-Si:H forms junction with built in electric field improving transport of photo-generated charges and also contribute to photocurrent because of carrier photo-generation due to absorption of long wave length photons. Thus, better harvesting of both short wave length (on the frontal side) and long wave length on rear side, together with improving charge collection, results in significant improvement inefficiency of up to $PCE = 26 \%$ [32]. Here it is worth to noticed that p-mk-Si:H, a-Si:H, a-Si_xC_{1-x}H, n-mk-Si:H layers are deposited by PE CVD technique. An example of current-voltage characteristics $J(U)$ under sun illumination is presented in Fig. 6, *a*. As seen the HJT structure shows short circuit current density $J_{sc} = 36 \text{ mA/cm}^2$ and excellent current collection up to voltage $U \approx 0.6 \text{ V}$. How-

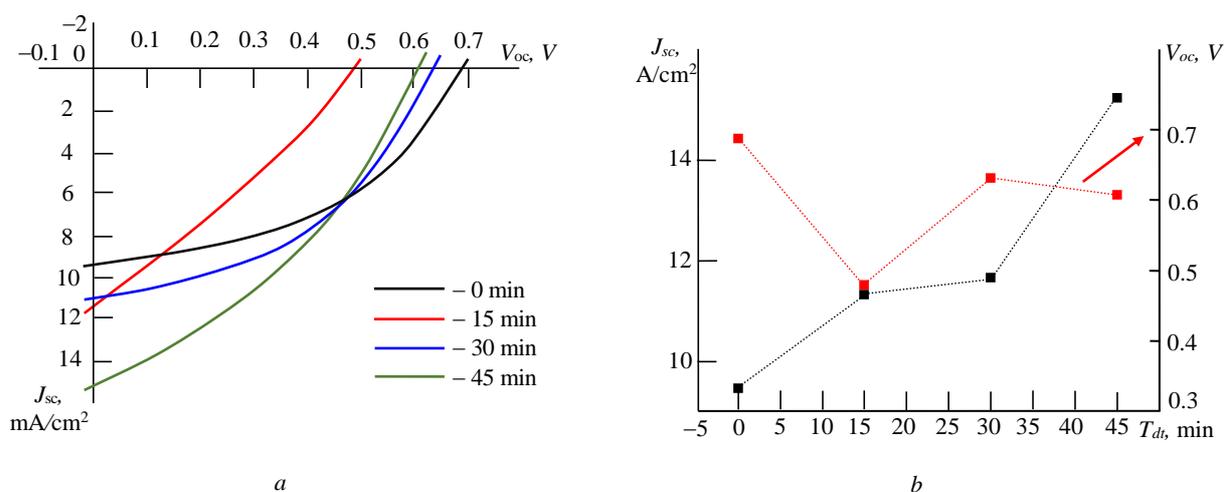


Fig. 4. Current density – voltage $J(V)$ characteristics and J_{sc} and V_{oc} parameters extracted from $J - V$ curves of hybrid solar cells structures for different dipping time in isopropyl alcohol: *a* – $J(V)$ characteristics under AM 1.5 solar illumination; *b* – J_{sc} and V_{oc} parameters extracted from $J(V)$ curves as a function of dipping time in isopropyl alcohol

ever, it would be of interest to study tandem structure consisting of both HJT (bottom junction) and hybrid h-n-i-p structure (top junction) based on PE CVD and organic films. $J(V)$ characteristics measured for these two junctions (in tandem) and also for integral tandem structure are shown in Fig. 6, *b*. The lower J_{SC} and V_{OC} values observed in the HJT structure incorporated in the tandem are related to filtering incident light by top side junction.

Fig. 7, *a* represents spectral dependence of external quantum efficiency (EQE, measured in a. u.) for the same sample of HJT solar cell (see structure in Fig. 5, *a*). This graph demonstrates effective harvesting of photons by the structure in the range of wavelength from $\lambda \approx 450$ nm to 1100 nm (practically entire visible and partly NIR part of sun spectrum).

Better shortwave response has been reported in hybrid structures with organic semiconductors in frontal part of the device structure [16]. Therefore, it would be of interest fabricate tandem structure with

top junction with organic semiconductors. An example of cross-section diagram for such structure is presented in Fig. 5, *b*. Bottom junction is reproduced HJT structure (Fig. 5, *a*), on the top of which hybrid junction is placed. The latter comprises glass substrate, transparent conductive layer (aluminium doped zinc oxide, AZO), *n*-type a-Si:H, intrinsic a-Si:H, *p*-type organic semiconductor PEDOT:PSS, and second transparent conductive oxide (AZO). We could expect better current collection for short wavelengths, because frontal built-in electric field is determined by the interface (PEDOT:PSS)-(i-a-Si:). Current-voltage

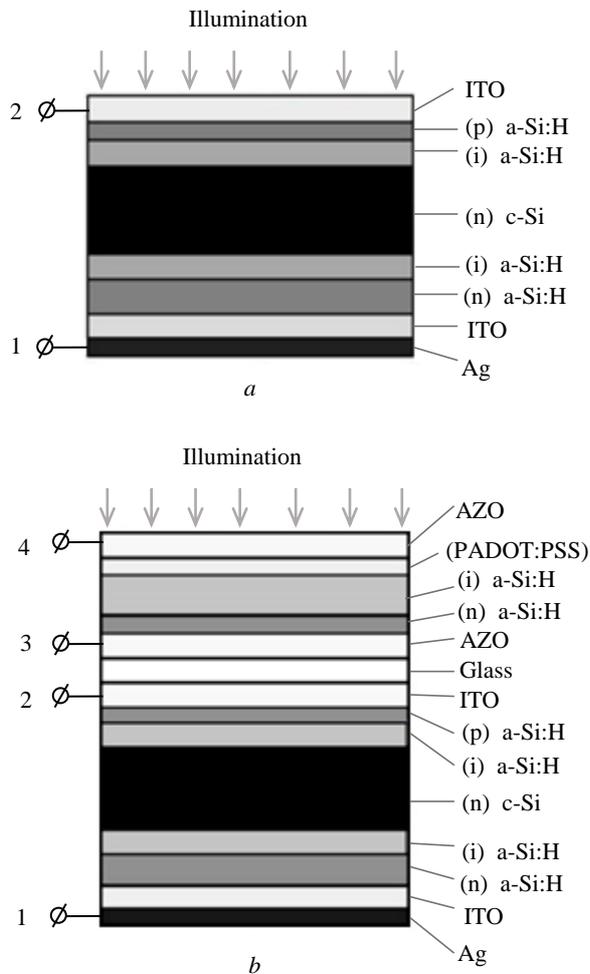


Fig. 5. Cross sectional view of HJT device with crystalline silicon: *a* – PECVD materials; *b* – HJT with OS incorporated

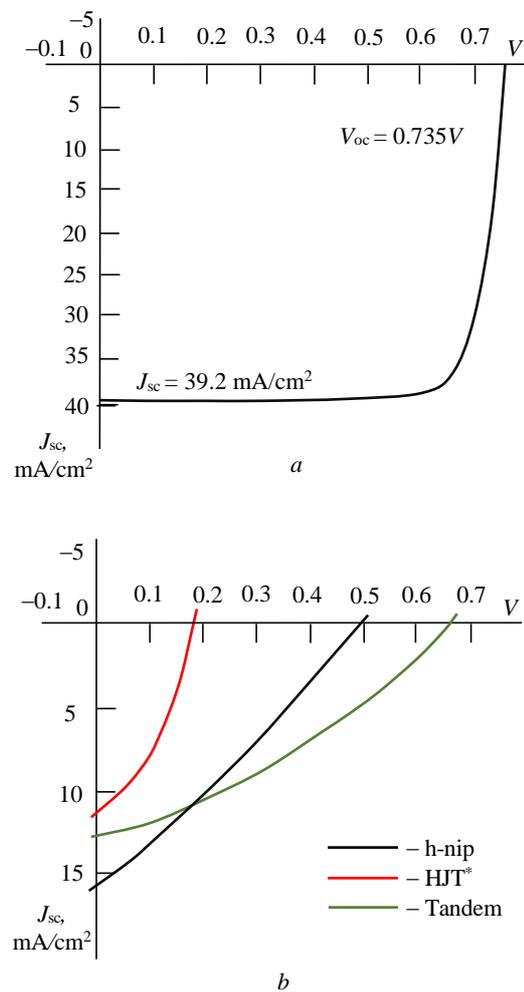


Fig. 6. Current density – voltage characteristics $J(V)$ measured under sun illumination: *a* – for only HJT* structure; *b* – in the integral tandem structure, which consists of bottom HJT junction and top h-nip junction; in the tandem $J(V)$ characteristics were measured separately for h-nip top junction providing $V_{OC} = 0.495$ V, $J_{SC} = 15.2$ mA/cm², for HJT* bottom junction providing $V_{OC} = 0.19$ V, $J_{SC} = 11.2$ mA/cm² and for the integral tandem providing $V_{OC} = 0.665$ V, $J_{SC} = 13$ mA/cm²

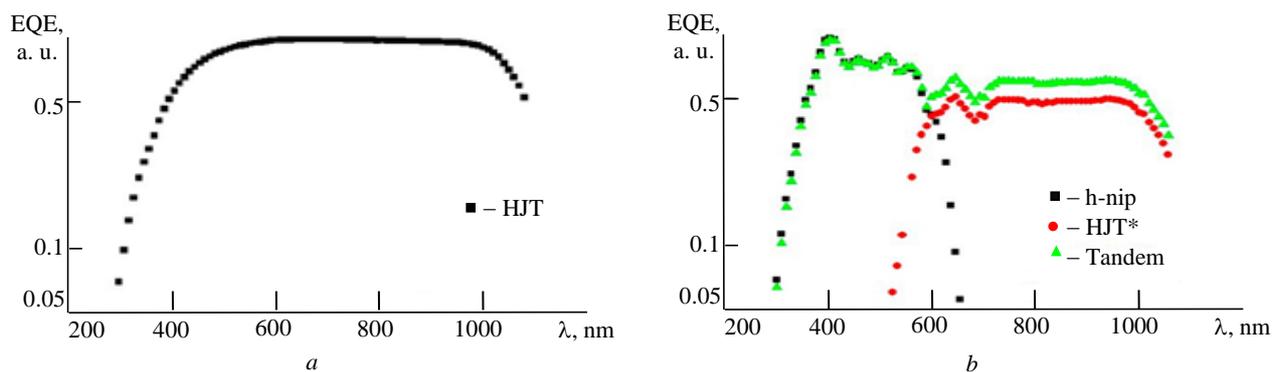


Fig. 7. Spectral dependence of external quantum efficiency $EQE = f(\lambda)$: *a* – for HJT* structure; *b* – in the integral tandem structure, which consists of bottom HJT junction and top h-nip junction; in the tandem $EQE = f(\lambda)$ characteristics were measured separately for h-nip top junction, for HJT* bottom junction and for the integral tandem

characteristics $I(V)$ of this structures represented in Fig. 6, *b* are measured for bottom HJT junction, top hybrid junction and tandem. The structure has not been optimized to achieve high current therefore J_{sc} is significantly less, mostly because the top junction works as optical filter, however both the junctions demonstrate their functions and open circuit voltage is equal to sum both junctions. Spectral characteristics of the tandem are shown in Fig. 7, *b*, one can see that HJT OS tandem demonstrate better response in the range of $\lambda = 300 \dots 450$ nm. It should be noted also that fabrication of the tandem demonstrates compatibility of fabrication processes for crystalline silicon, PECVD materials and organic semiconductors.

Outlook. In this paper we have briefly described and analyzed two classes of materials: PECVD and organic semiconductors. These both are artificial materials with impressive possibilities for material engi-

neering. However, they have different level of both characterization (data volume, interpretation of the results etc.) and understanding of physical processes determining device performance. We have also considered some examples of these materials in photovoltaic devices in different combinations including structures with crystalline silicon.

A very important advantage of both PECVD and organic materials is that technologies of their fabrication are compatible and allow a fabrication of hybrid device structures on crystalline semiconductors (e.g. on crystalline silicon). This paves the way for a great variety of hybrid device structures. At present advantages of such devices are difficult to predict because of shortage of data reported in scientific literature, but new territory in material science and related devices has definitely appeared for further exploring and exploiting.

Author's contributions

Andrey Kosarev, supervision of the study, writing a working version.

Ismael Cosme, research, processing of results, preparation of organic materials.

Svetlana Mansurova, research, optical end electrical characterization of samples.

Dmitriy Andronikov, research, processing of results, PECVD fabrication of silicon (Si) based materials.

Alexey Abramov, research, methodology development, optical end electrical characterization of samples.

Igor Shakhrai, research, processing of results, fabrication of PECVD materials, optimization properties for device application.

Eugeny Terukov, concept development, methodology development, general management, assessment of results.

References

1. Krebs Frederik C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2009, vol. 93, iss. 4, pp. 394–412. doi: 10.1016/j.solmat.2008.10.004
2. Spear W. E., Le P.G. Comber Electronic propertiesw

of substitutionally doped amorphous Si and Ge. *Philosophical Magazine*. 1976, vol. 33, iss. 6, pp. 935–949. doi: 10.1080/14786437608221926

3. Yang J, Banerjee A., Guha S. Triple junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0%

stable conversion efficiencies. *Appl. Phys. Lett.* 1997, vol. 70, iss. 22, pp. 2975–2977. doi: 10.1063/1.118761

4. Shah A. V., Shade H., Vanecek M., Meier J., Vallat-Sauvain E., Wyrsh N., Kroll U., Droz C., Bailat J. Thin film silicon solar cell technology. *Prog-Photovolt: Res. Appl.* 2004, vol. 12, iss. 23, pp. 113–142. doi: 10.1002/pip.533

5. Gather M. C., Mansurova S., Meerholz K. Determining the photoelectric parameters of an organic photoconductor by the photoelectromotive-force technique. *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 75, iss. 16. doi: 10.1103/physrevb.75.165203

6. Moon J. S., Takacs C. J., Sun Y., Heeger A. J. Spontaneous Formation of Bulk Heterojunction Nanostructures: Multiple Routes to Equivalent Morphologies, *Nano Lett.* 2011, vol. 11, iss. 3, pp. 1036–1039. doi: 10.1021/nl200056p

7. Yang X., Loos J., Veenstra S. C., Verhees W. J. H., Wienk M. M., Kroon J. M., Michels M. A. J., Janssen R. A. J. Nanoscale Morphology of High-Performance Polymer Solar Cells *Nano Lett.* 2005, vol. 5, iss. 4, pp. 579–583. doi: 10.1021/nl048120i

8. Peet J., Kim J. Y., Coates N. E., Ma W. L., Moses D., Heeger A. J., Bazan G. C., Efficiency enhancement in low-bandgap polymer solar cells by processing with alkane dithiols. *Nat. Mater.* 2007, vol. 6, iss. 7, pp. 497–500. doi: 10.1038/nmat1928

9. Ma W., Yang C., Gong X., Lee K., Heeger A. J. Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of the Interpenetrating Network Morphology, *Adv. Funct. Mater.* 2005, vol. 15, iss. 10, pp. 1617–1622. doi: 10.1002/adfm.200500211

10. Li G., Shrotriya V., Huang J., Yao Y., Moriarty T., Emery K., Yang Y. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. *Nat. Mater.* 2005, vol. 4, iss. 11, pp. 864–868. doi: 10.1038/nmat1500

11. Lee J. K., Ma W. L., Brabec C. J., Yuen J., Moon J. S., Kim J. Y., Lee K., Bazan G. C., Heeger A. J. Processing additives for improved efficiency from bulk heterojunction solar cells. *J. Am. Chem. Soc.* 2008, vol. 130, iss. 11, pp. 3619–3623. doi: 10.1021/ja710079w

12. Guo X., Marks T. J. Plastic solar cells with engineered interfaces. *Proc. SPIE., Proc. Art.* published 6 Mar 2013 in *Organic Photonic Materials and Devices XV*, 2013. doi: 10.1117/12.2013491

13. Zeng H., Zhu X., Liang Y., Guo X. Interfacial Layer Engineering for Performance Enhancement in Polymer Solar Cells. *Polymers.* 2015, vol. 7, iss. 2, pp. 333–372. doi: 10.3390/polym7020333

14. Steim R., Kogler F. R., Brabec C. J. Interface materials for organic solar cells. *J. Mater. Chem.*, vol. 20, iss. 13, 2499 p., 2020. doi: 10.1039/b921624c

15. Choi H., Kim H.-B., Ko S.-J., Kim J. Y., Heeger A. J. An organic surface modifier to produce a high work function transparent electrode for high performance polymer solar cells. *Adv. Mater.* 2015, vol. 27, iss. 5, pp. 892–896. doi: 10.1002/adma.201404172

16. Kim J. Y., Kim S. H., Lee H. H., Lee K., Ma W., Gong X., Heeger A. J. New Architecture for High-Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-Based Titanium Oxide as an Optical Spacer. *Adv. Mater.* 2006,

vol. 18, iss. 5, pp. 572–576, doi: 10.1002/adma.200501825

17. Hadipour A., B. de Boer, Wildeman J., Kooistra F. B., Hummelen J. C., Turbiez M. G. R., Wienk M. M., Janssen R. A. J., Blom P. W. M. Solution-processed organic tandem solar cells. *Adv. Funct. Mater.* 2016, vol. 16, iss. 14, pp. 1897–1903. doi: 10.1002/adfm.200600138

18. Kim J. Y., Lee K., Coates N. E., Moses D., Nguyen T.-Q., Dante M., Heeger A. J. Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing. *Science.* 2007, vol. 317, iss. 5835, pp. 222–225. doi: 10.1126/science.1141711

19. Sista S., Hong Z., Park M.-H., Xu Z., Yang Y. High-Efficiency Polymer Tandem Solar Cells with Three-Terminal Structure. *Adv. Mater.* 2010, vol. 22, iss. 8, pp. E77–E80. doi: 10.1002/adma.200902750

20. Dou L., You J., Yang J., Chen C.-C., He Y., Murase S., Moriarty T., Emery K., G. Li, Yang Y. Tandem polymer solar cells featuring a spectrally matched low-bandgap polymer. *Nat. Photonics.* 2012, vol. 6, iss. 3, pp. 180–185. doi: 10.1038/nphoton.2011.356

21. Chen C.-C., Chang W.-H., K. Yoshimura, Ohya K., You J., Gao J., Hong Z., Yang Y. An efficient triple-junction polymer solar cell having a power conversion efficiency exceeding 11%. *Adv. Mater.* 2014, vol. 26, iss. 32, pp. 5670–5677. doi: 10.1002/adma.201402072

22. Wienk M. M., Kroon J. M., Verhees W. J. H., Knol J., Hummelen J. C., van Hal P. A., Janssen R. A. J. Efficient methano[70]fullerene/MDMO-PPV bulk heterojunction photovoltaic cells. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2003, vol. 42, iss. 29, pp. 3371–3375. doi: 10.1002/anie.200351647

23. Winder C., Sariciftci N. S. Low bandgap polymers for photon harvesting in bulk heterojunction solar cells. *J. Mater.* 2004, *Chem.*, vol. 14, iss. 7, 1077 p. doi: 10.1039/b306630d

24. Kroon R., Lenes M., Hummelen J. C., Blom P. W. M., de Boer B. Small Bandgap Polymers for Organic Solar Cells (Polymer Material Development in the Last 5 Years). *Polym. Rev.* 2008, vol. 48, iss. 3, pp. 531–582. doi: 10.1080/15583720802231833

25. Bundgaard E., Krebs F. C. Low band gap polymers for organic photovoltaics. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2007, vol. 91, iss. 11, pp. 954–985. doi: 10.1016/j.solmat.2007.01.015

26. Zhu Z., Waller D., Gaudiana R., Morana M., Mühlbacher D., Scharber M., Brabec C. Panchromatic Conjugated Polymers Containing Alternating Donor/Acceptor Units for Photovoltaic Applications. *Macromolecules.* 2007, vol. 40, iss. 6, pp. 1981–1986. doi: 10.1021/ma062376o

27. Facchetti A. Mater. Polymer donor–polymer acceptor (all-polymer) solar cells. *Materials Today.* 2013, vol. 16, iss. 4, pp. 123–132. doi: 10.1016/j.mattod.2013.04.005

28. Zhao J., Li Y., Yang G., Jiang K., Lin H., Ade H., Ma W., Yan H. Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents. *Nat. Energy.* 2016, vol. 1, iss. 2. doi: 10.1038/nenergy.2015.27

29. Dou L., You J., Chen C.-C., Li G., Yang Y. Plastic Solar Cells: Breaking the 10% Commercialization Barrier. *Proc. SPIE.*, 25 Sep. 2012. doi: 10.1117/12.930410

30. Naguchi M., Yano A., Tohoda S., Matsuyama K.,

Nakamura Y., Nishiwaki T., Fujita K., Maruyama E. 24.7%
Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer, IEEE
J. Photovoltaics. 2014, vol. 4, iss. 1, pp. 96–99. doi:
10.1109/JPHOTOV.2013.2282737

31. Naguchi M., Yano A., Tohoda S., Matsuyama K.,
Nakamura Y., Nishiwaki T., Fujita K., Maruyama E. 24.7 %
Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer, IEEE J.
Photovoltaics. 2014, vol. 4, iss. 1, pp. 96–99. doi:
10.1109/JPHOTOV.2013.2282737

Information about the authors

Andrey Kosarev, Cand. Sci. (Eng.) in Physics and Mathematics in the specialty of "Semiconductors and Dielectrics" (1978), Professor Researcher at National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics Dept. (INAOE), Mexico. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: physics of amorphous semiconductors. Address: at National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE), Puebla, 42840, Mexico
E-mail: andrey-1409@mail.ru

Ismael Cosme, PhD from INAOE in 2013, Associated researcher, Optics and Electronics Dept. (INAOE), Mexico. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: physics of amorphous semiconductors. Address: CONACyT-INAOE, Puebla, 42840, Mexico
E-mail: ismaelcb@inaoep.mx

Svetlana Mansurova, PhD from National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics (Mexico) in 1998. Titular Researcher, Optics and Electronics Dept. (INAOE), Puebla, Mexico. The author of 25 scientific publications. Area of expertise: electronic properties of semiconductors. Address: National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE), Puebla, 42840, Mexico
E-mail: smansurova@inaoep.mx

Dmitriy Andronikov, Cand. Sci. (Eng.) in Physics and Mathematics in the specialty of "Semiconductors and Dielectrics" (2013), R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics LLC, (RDC TFTE), St Petersburg, Russian Federation. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: physic of amorphous semiconductors, development of solar cells and module. Address: R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics LLC, 28 Polytechnicheskaya St., 194064, St Petersburg, Russia
E-mail: d.andronikov@hevelsolar.com

Alexey Abramov, Cand. Sci. (Eng.) in Physics and Mathematics in the specialty of "Semiconductors and Dielectrics" (2001), R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics LLC, St Petersburg, Russian Federation. The author of more than 85 scientific publications. Area of expertise: physic of amorphous semiconductors, development of solar cells and module. Address: R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics LLC, 28 Polytechnicheskaya St., 194064, St Petersburg, Russia
E-mail: a.abramov@hevelsolar.com

Igor Shakhray, CEO from Hevel LLC, Doctorant at Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St Petersburg, Russian Federation. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: physic of solar cells and module. Address: Hevel LLC, 429950, Novocheboksarsk, Russia
E-mail: i.shakhray@hevelsolar.com

Eugeny Terukov, Dr. Sci. (Eng.) in Technical Sciences in the specialty of "Semiconductors and Dielectrics" (1996), Professor, Head of laboratory of Ioffe Physics and technical Institute, St Petersburg. The author of more than 400 scientific publications. Area of expertise: physic and technology of amorphous semiconductors, semiconductors devices. Address: Ioffe Physics and technical Institute, 26 Polytechnicheskaya St., 194021, St Petersburg, Russia
E-mail: eug.terukov@mail.ioffe.ru

Радиофотоника

УДК 537.87

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56>

Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну

И. Ю. Таценко¹, Т. К. Легкова¹, А. В. Иванов², А. Б. Устинов¹✉

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

² АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха", Москва, Россия

✉ ustinov-rus@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время большой научный и практический интерес вызывает передача радиочастотного сигнала по оптической линии. Такую линию передачи можно также использовать при создании многих радиофотонных устройств. С ростом мощности используемого лазера снижаются потери СВЧ-сигнала в линии передачи. Однако массово выпускаемые фотодетекторы выдерживают мощность в несколько десятков милливатт. Использование фотодетектора с высоким фототоком позволит улучшить характеристики оптоволоконных линий передачи, в частности, снизить потери при передаче аналогового или цифрового радиочастотного сигнала.

Цель. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком в системе передачи сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну, а также исследование зависимости потерь СВЧ-сигнала от значения мощности оптического излучения в такой системе.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены на сконструированных экспериментальных схемах для исследования характеристик фотодетектора при модулированном и немодулированном оптическом излучении. Теоретические исследования выполнены математическим моделированием передаточных характеристик оптического тракта при различных мощностях входного СВЧ-сигнала.

Результаты. Найден зависимости фототока и фотонапряжения фотодетектора от мощности излучения лазера. Представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) оптической линии передачи, измеренные при различных мощностях оптического излучения. Описан алгоритм получения частотной зависимости чувствительности фотодетектора в диапазоне частот 0...12 ГГц. Приведены результаты теоретического расчета АЧХ линии передачи в указанном диапазоне частот. Получена приближенная частотная зависимость чувствительности фотодетектора.

Заключение. За счет использования фотодетектора с высоким значением фототока и повышения мощности лазера до 100 мВт потери СВЧ-сигнала в оптической линии передачи составили около 10 дБ. Показано, что для улучшения передаточных характеристик оптической линии передачи необходимо использовать широкополосный электрооптический модулятор.

Ключевые слова: радиофотоника, фотодетектор, радиофотонная линия передачи

Для цитирования: Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну / И. Ю. Таценко, Т. К. Легкова, А. В. Иванов, А. Б. Устинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № 0788-2020-0005).

Авторы выражают благодарность В. В. Щербакову (АО "Центр ВОСПИ") за предоставленное оптическое волокно для проведения исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.05.2020; принята к публикации после рецензирования 10.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber

Ivan Yu. Tatsenko¹, Tat'yana K. Legkova¹, Andrey V. Ivanov², Alexey B. Ustinov¹✉

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, Russia

✉ ustinov-rus@mail.ru

Abstract.

Introduction. At present, an optical transmission of a microwave signal is of great scientific and practical interest. Moreover, this transmission line can also be used to create microwave photonic devices. Microwave signal losses decrease with an increase of laser power. Commercial photodetectors withstand radiation with a power of several tens of milliwatts. Using a photodetector with a high photocurrent can improve characteristics of photonic transmission lines; in particular, it can reduce microwave signal losses.

Aim. Investigation of characteristics of a photodetector with a high photocurrent when transmitting microwave radio signals through optical fiber. Research of microwave signal losses as a function of optical power.

Materials and Methods. Experimental studies were carried out on created experimental schemes for studying the characteristics of the photodetector with modulated and unmodulated optical radiation. Theoretical studies were carried out by mathematical modeling of optical path transfer characteristics from the laser power at various powers of an input microwave signal.

Results. The dependencies of photocurrent and photovoltage of the photodetector versus laser power were obtained. The experimental amplitude-frequency characteristics of the photonic transmission line were measured at different optical powers. A frequency dependence of the photodetector sensitivity in the range of 0...12 GHz was obtained. Modeling of amplitude-frequency characteristics of the optical path in the range of 0...12 GHz was performed. An approximate frequency dependence of the photodetector sensitivity was obtained.

Conclusion. Due to the use of a photodetector with a high photocurrent value and with increasing laser power, microwave losses were reduced to about 10 dB. It was shown that for improving the transmission characteristics of an optical transmission line, it is necessary to use a broadband electro-optical modulator.

Keywords: microwave photonics, photodetector, microwave photonic transmission line

For citation: Tatsenko I. Yu., Legkova T. K., Ivanov A. V., Ustinov A. B. Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56

Acknowledgments. This work was supported in part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project "Goszadanie", grant № 0788-2020-0005).

The authors are grateful to I. A. Tolkachev for performing calculations in the TCAD Synopsys simulation package.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 28.05.2020; accepted 10.07.2020; published online 23.09.2020

Введение. В последние годы радиофотоника стала актуальным направлением развития науки и техники. В частности, большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование линий передачи радиосигнала по оптическому волокну [1–3]. Помимо непосредственной передачи радиосигнала такие линии передачи можно использовать в устройствах генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов [4–16],

сканирующих приемниках [17, 18], для оптического усиления [19, 20] и др. [21–30].

Оптоволоконная линия передачи (ОВЛП) радиосигнала состоит из лазера, электрооптического модулятора, оптоволоконной линии задержки и фотодетектора. За счет использования одномодового оптоволокна достигаются низкие потери оптического излучения с длиной волны порядка 1550 нм. Использование быстродействующих

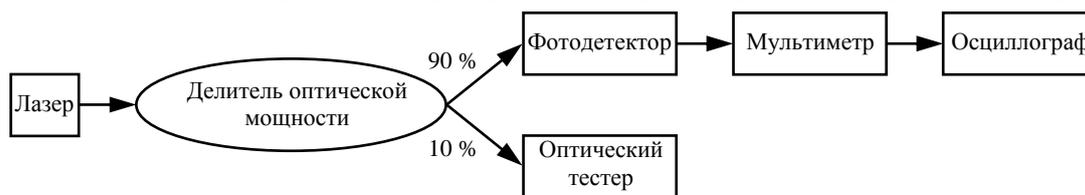


Рис. 1. Схема исследования характеристик фотодетектора при немодулированном излучении

Fig. 1. Scheme for measurements of the photodetector characteristics with continuous laser intensity

щих фотодетекторов и электрооптических модуляторов позволяет реализовать радиофотонные системы в диапазоне до десятков гигагерц.

Известно, что потери СВЧ-сигнала в ОВЛП уменьшаются с ростом мощности лазерного излучения [1–3]. Типичные фотодетекторы, выпускаемые промышленностью, выдерживают на входе оптическое излучение в несколько десятков милливатт, что соответствует потерям порядка 30 дБ. Для уменьшения потерь необходимо использовать фотодетекторы с высоким фототоком, выдерживающие повышенную мощность оптического излучения.

Целью работы, описываемой в настоящей статье, явилось исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну, а также исследование зависимости потерь СВЧ-сигнала от мощности оптического излучения. Фотодетектор "Пром-17" был разработан и изготовлен в АО "НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха". В эксперименте СВЧ-выход фотодетектора был нагружен на сопротивление 50 Ом, равное его волновому сопротивлению. Верхняя граничная частота составляла 12 ГГц.

Экспериментальные характеристики фотодетектора при немодулированном излучении. Для экспериментального исследования характеристик фотодетектора в зависимости от мощности лазера при немодулированном излучении была со-

брана схема, представленная на рис. 1. Схема состоит из лазера с номинальной мощностью 100 мВт на излучении с длиной волны 1550 нм, делителя оптической мощности, фотодетектора, мультиметра, осциллографа и оптического тестера.

Принцип работы схемы заключается в следующем. Излучение с лазера подается на оптический делитель. Примерно 90 % мощности поступает на фотодетектор, а около 10 % – на оптический тестер. С помощью мультиметра и осциллографа измеряются фототок и фотонапряжение соответственно.

Мощность оптического излучения контролируется оптическим тестером. Для этого сначала калибруется оптический делитель и с высокой точностью определяется коэффициент деления. Затем мощность, измеренная оптическим тестером, пересчитывается в мощность, поступающую на фотодетектор.

На рис. 2 представлены зависимости фототока $I_{фд}$ и фотонапряжения $U_{фд}$ фотодетектора от мощности лазера. На полученных зависимостях можно выделить линейный участок и область насыщения. При падающей мощности до 60 мВт происходит линейный рост фототока и фотонапряжения. Исходя из зависимости фототока определена чувствительность фотодетектора на линейном участке при непрерывном оптическом излучении, составившая 0.8 А/Вт. При дальнейшем увеличении оптической мощности наблюдается переход в насыщение, который обусловлен возникно-

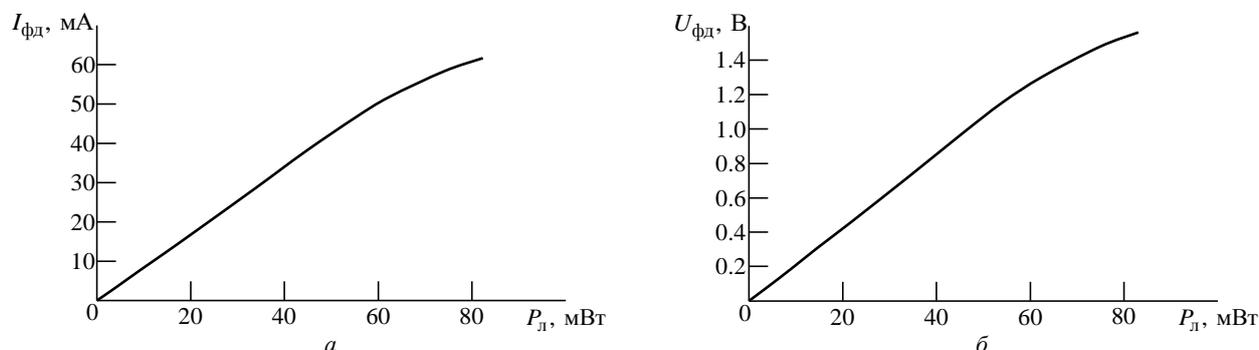


Рис. 2. Зависимость фототока (а) и фотонапряжения (б) фотодетектора от мощности лазера

Fig. 2. Photocurrent (a) and photovoltage (b) vs laser power

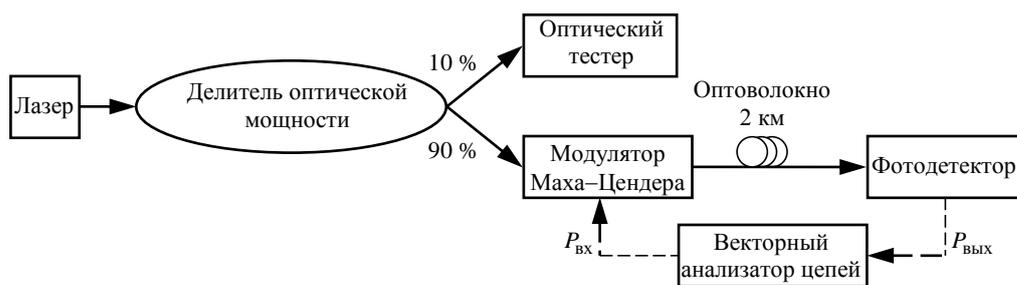


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик фотодетектора при синусоидальной модуляции оптического излучения, а также для измерения АЧХ линии передачи

Fig. 3. Scheme for measurement of the characteristics of a photodetector under sinusoidal modulation of optical radiation, as well as for measurement of the amplitude-frequency characteristic of the transmission line

вением пространственного заряда в области поглощения излучения. С ростом интенсивности оптического излучения концентрация электронов и дырок становится больше концентрации примеси в поглощающем слое. Носители заряда распределяются неравномерно из-за различий в дрейфовой скорости, искажая распределение электрического поля и приводя к насыщению [1].

Экспериментальное исследование характеристик фотодетектора при модулированном оптическом сигнале. На следующем этапе проведено исследование амплитудно-частотных характеристик ОВЛП при модуляции оптической несущей СВЧ-радиосигналом. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Установка состоит из лазера с номинальной мощностью 100 мВт на длине волны излучения 1550 нм, делителя оптической мощности, электрооптического модулятора Маха-Цендера, оптоволоконной линии задержки длиной 2 км, фотодетектора, векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA40 и оптического тестера. Эксперименты проводились с модулятором Маха-Цендера, имеющим полуволновое напряжение $U_{\pi} = 1.6$ В, верхнюю граничную частоту 30 ГГц и оптические потери в максимуме коэффициента передачи 4.5 дБ.

Установка работает следующим образом. Излучение лазера поступает на делитель мощности, который ответвляет примерно 90 % излучения на модулятор Маха-Цендера. Оптическое излучение, модулированное СВЧ-сигналом, проходит через оптоволоконную линию задержки и подается на фотодетектор, на выходе которого формируется электрический СВЧ-сигнал, пропорциональный интенсивности оптического излучения. С помощью векторного анализатора цепей измеряется коэффициент передачи СВЧ-сигнала S_{21} от управляющего входа модулятора до выхода фотодетектора. Рабочая точка модулятора находится в квад-

ратуре, так как это позволяет передавать радиосигнал с минимальными искажениями.

Результаты. На рис. 4 маркерами представлены экспериментальные АЧХ линии передачи, полученные при различных мощностях лазера. Из графиков видно, что с ростом частоты СВЧ-сигнала в диапазоне 0...12 ГГц коэффициент его передачи плавно уменьшается. Такое поведение может быть обусловлено как снижением чувствительности фотодетектора, так и уменьшением коэффициента передачи модулятора. Измерения также показали, что при увеличении мощности излучения лазера передаточная характеристика смещается вверх, так как мощность СВЧ-сигнала на выходе фотодетектора пропорциональна интенсивности оптического излучения. Резкий спад АЧХ выше частоты 12 ГГц обусловлен верхней граничной частотой фотодетектора.

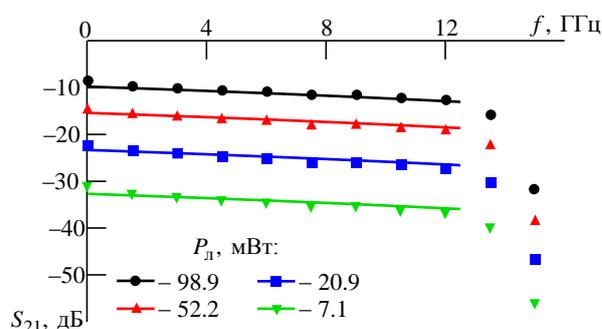


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики линии передачи радиосигнала по оптоволокну при различных мощностях излучения лазера (маркеры – эксперимент, кривые – теория)

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the transmission line of a radio signal over an optical fiber for various laser radiation power (markers – experiment, curves – theory)

Обсуждение. На рис. 5 представлена передаточная характеристика модулятора, приведенная в его паспорте предприятием-изготовителем. Из этой характеристики видно, что на частотах до 12 ГГц ко-

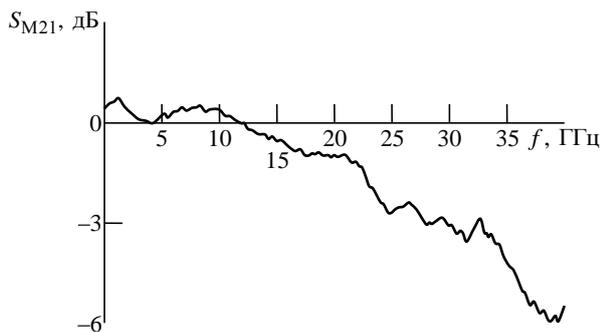


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента передачи модулятора Маха–Цендера, приведенная к 0 дБ

Fig. 5. The transmission characteristic of the Mach–Zehnder modulator, reduced to 0 dB, vs frequency

эффицент передачи отклоняется от среднего значения 0.3 дБ в пределах ± 0.3 дБ. Следовательно, в диапазоне частот до 12 ГГц спад коэффициента передачи ОВЛП обусловлен только частотной зависимостью чувствительности фотодетектора.

Для определения зависимости чувствительности фотодетектора от частоты были рассчитаны АЧХ линии передачи. Выходная мощность фотодетектора рассчитывалась по формуле [3]

$$P_{\text{вых}} = R \left[P_{\text{л}} S_{\text{фд}} J_1 \left(\frac{\pi U_{\text{м.с}}}{U_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi U_{\text{см}}}{U_{\pi}} \right) \right]^2,$$

где $R = 50$ Ом – сопротивление нагрузки фотодетектора; $P_{\text{л}}$ – мощность лазера; $S_{\text{фд}} = 0.8$ А/Вт – чувствительность фотодетектора; $J_1(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка; $U_{\text{м.с}}$ – напряжение модулирующего сигнала; $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения рабочей точки. Коэффициент передачи определялся как отношение выходной СВЧ-мощности фотодетектора к СВЧ-мощности, поданной на управляющий вход модулятора

Маха–Цендера. Зависимость чувствительности фотодетектора от частоты была найдена сопоставлением рассчитанных и экспериментальных АЧХ.

Сопоставление показало, что с увеличением частоты от 0 до 12 ГГц чувствительность фотодетектора снижается от 0.8 до 0.56 А/Вт. Учитывая, что коэффициент передачи оптического тракта уменьшается линейно, можно получить приближенную частотную зависимость чувствительности фотодетектора в данном диапазоне. Зная, что при нулевой частоте чувствительность фотодетектора равна 0.8 А/Вт, а при частоте 12 ГГц она равна 0.56 А/Вт, нетрудно получить следующее линейное выражение для частотной зависимости чувствительности фотодетектора:

$$S(f) = 0.8 - 0.2 \cdot 10^{-10} f. \quad (1)$$

Рассчитанные зависимости АЧХ линии передачи представлены кривыми на рис. 4. Сопоставление теории и эксперимента показывает, что выражение (1) хорошо описывает чувствительность фотодетектора в диапазоне частот 0...12 ГГц.

Заключение и выводы. В настоящей статье представлены результаты исследования характеристики фотодетектора при непрерывном и модулированном оптическом излучении, а также АЧХ оптоволоконной линии передачи радиочастотного сигнала, использующего такой фотодетектор. Исходя из экспериментальных данных найдена теоретическая зависимость чувствительности фотодетектора от частоты. Показано (рис. 4), что повышение мощности лазера до 100 мВт позволяет уменьшить потери СВЧ-сигнала в линии передачи примерно до 10 дБ. Предложен метод определения частотной зависимости чувствительности фотодетектора.

Авторский вклад

Таценко Иван Юрьевич – проведение экспериментальных измерений и математических расчетов.
Легкова Татьяна Константиновна – проведение экспериментальных измерений.
Иванов Андрей Викторович – разработка и изготовление фотодетектора.
Устинов Алексей Борисович – постановка задачи и руководство научными исследованиями.
 Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Ivan Yu. Tatsenko, carrying out measurements and calculations.
Tat'yana K. Legkova, carrying out measurements.
Andrey V. Ivanov, development and manufacture of photodetector.
Alexey B. Ustinov, formulation of the problem and management of the work.
 All authors participated in the discussion of the results and preparation of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Signal-to-Noise Performance of Two Analog Photonic Links using Different Noise Reduction Techniques / E. I. Ackerman, G. E. Betts, W. K. Burns, J. C. Campbell, C. H. Cox, N. Duan, J. L. Prince, M. D. Regan, H. V. Rousell // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii, 2007. P. 51–54.
2. Сверхширокополосный многофункциональный радиофотонный приемный тракт для аналоговой обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А. А. Белоусов, Ю. Н. Вольхин, А. В. Гамиловская, А. А. Дубровская, Е. В. Тихонов // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. ст. IV Всерос. конф., Санкт-Петербург, 1–4 июня 2015 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. Т. 1. С. 337–341.
3. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора / А. Н. Петров, А. В. Тронеv, В. В. Лебедев, И. В. Ильичев, Е. Н. Величко, А. В. Шамрай // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 5. С. 131–136. doi: 10.1134/S1063784215050217
4. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic Microwave Oscillator // J. of the Optical Society of America B. 1996. Vol. 13, № 8. P. 1725–1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725
5. Tunable RF-band Optoelectronic Oscillator and Optoelectronic Computer-Added Design Model for its Simulation / M. E. Belkin, A. V. Loparev, Y. Semenova, G. Farrell, A. S. Sigov // Microwave and Optical Technology Lett. 2011. Vol. 53, № 11. P. 2474–2477. doi: 10.1002/mop.26304
6. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable Frequency-Quadrupling Dual-Loop Optoelectronic Oscillator // IEEE Photonics Technology Lett. 2012. Vol. 24. P. 194–196. doi: 10.1109/LPT.2011.2176332
7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Electronically Tunable Spin-Wave Optoelectronic Microwave Oscillator // Tech. Phys. 2015. Vol. 60, № 9. P. 1392–1396. doi: 10.1134/S1063784215090224
8. Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Theory of a Tunable Spin-Wave Optoelectronic Microwave Oscillator // Technical Physics. 2015. Vol. 60, № 9. P. 1397–1401. doi: 10.1134/S1063784215090145
9. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator // IEEE Magnetics Lett. 2015. Vol. 6. P. 1–4. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
10. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. A Microwave Photonic Generator of Chaotic and Noise Signals // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42, № 4. P. 403–406. doi: 10.1134/S1063785016040283
11. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. Dynamic Modes of Microwave Signal Autogeneration in a Radio Photonic Ring Generator // Technical Physics. 2017. Vol. 62, № 2. P. 287–293. doi: 10.1134/S1063784217020153
12. Self-Generation of Chaotic Microwave Signal in Spin Wave Optoelectronic Generator / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, A. V. Drozdovskii, B. A. Kalinikos // Phys. Solid State. 2018. Vol. 60, № 11. P. 2127–2131. doi: 10.1134/S106378341811032X
13. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, V. V. Lebedev, A. N. Petrov, A. V. Shamrai, B. A. Kalinikos // J. of Phys.: Conf. Oct. 2019. Vol. 1326. Art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
14. A Model for Designing Ultralow Noise Single-and Dual-Loop 10-GHz Optoelectronic Oscillators / O. Lelievre, V. Crozatier, P. Berger, G. Baili, O. Llopis, D. Dolfi, P. Nouchi, F. Goldfarb, F. Bretenaker, L. Morvan, G. Pillet // J. of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, № 20. P. 4366–4374. doi: 10.1109/JLT.2017.2729018
15. Highly Spectrally Pure 90-GHz signal Synthesis using a Coupled Optoelectronic Oscillator / A. Ly, V. Auroux, R. Khayat-zadeh, N. Gutierrez, A. Fernandez, O. Llopis // IEEE Photonics Technology Lett. 2018. Vol. 30, № 14. P. 1313–1316. doi: 10.1109/LPT.2018.2845747
16. High-Performance Millimeter-Wave Synergetic Optoelectronic Oscillator with Regenerative Frequency-Dividing Oscillation Technique / A. Liu, Y. Yang, R. Song, J. Liu, J. Dai, Z. Tian, K. Xu // Optics express. 2019. Vol. 27, № 7. P. 9848–9856. doi: 10.1364/OE.27.009848
17. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System / P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, A. Capria, S. Pinna, E. Lazzi, C. Porzi, M. Scaffardi, A. Malacarne, V. Vercesi, E. Lazeri, F. Berizzi, A. Bogoni // Nature. 2014. Vol. 507, iss. 7492. P. 341–345. doi: 10.1038/nature13078
18. A Photonically Enabled Compact 0.5–28.5 GHz RF Scanning Receiver / D. Onori F. Scotti, F. Laghezza, M. Bartocci, A. Zaccaron, A. Tafuto, A. Albertoni, A. Bogoni, P. Ghelfi // J. of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36, № 10. P. 1831–1839. doi: 10.1109/JLT.2018.2792304
19. All-Optical RF Amplification toward Gpbs Communications and Millimeter-Waves Applications / A. L. M. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, A. Bogoni, M. Hirano, A. Cerqueira Sodr  // Microwave and Optical Technology Lett. 2017. Vol. 59, № 9. P. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704
20. Thermal and Dynamic Range Characterization of a Photonics-Based RF Amplifier / D. F. Noque, R. M. Borges, A. L. M. Muniz, A. Bogoni, Arismar Cerqueira S. Jr. // Optics Communications. 2018. Vol. 414. P. 191–194. doi: 10.1016/j.optcom.2018.01.015
21. Wideband 360° Microwave Photonic Phase Shifter based on Slow Light in Semiconductor Optical Amplifiers / W. Xue, S. Sales, J. Capmany, J. Mørk // Optics Express. 2010. Vol. 18, iss. 6. P. 6156–6163. doi: 10.1364/OE.18.006156
22. Fully Tunable 360° Microwave Photonic Phase Shifter based on a Single Semiconductor Optical Amplifier / J. Sancho, J. Lloret, I. Gasulla, S. Sales, J. Capmany // Optics Express. 2011. Vol. 19, iss. 18. P. 17421–17426. doi: 10.1364/OE.19.017421
23. Widely Tunable Microwave Photonic Notch Filter

based on Slow and Fast Light Effects / W. Xue, S. Sales, J. Mørk, J. Capmany // IEEE Photonics Technology Lett. 2009. Vol. 21, № 3. P. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468

24. Yan Y., Yao J. P. A tunable Photonic Microwave Filter with a Complex Coefficient using an Optical RF Phase Shifter // IEEE Photonics Technology Lett. 2007. Vol. 19, № 19. P. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753

25. Yi X., Huang T. X. H., Minasian R. A. Tunable and Reconfigurable Photonic Signal Processor with Programmable All-Optical Complex Coefficients // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58, № 11. P. 3088–3093. doi: 10.1109/TMTT.2010.2076931

26. Programmable Multi-Tap Microwave Photonic Phase Filtering via Optical Frequency Comb Shaping / M. H. Song, V. Torres-Company, R. Wu, E. Hamidi, A. M. Weiner // 2011 Intern. Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conf. Singapore, Oct. 18–21, 2011. P. 37–40. doi: 10.1109/MWP.2011.6088663

27. Zeng F., Wang J., Yao J. P. All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients based on a Phase Modulator and linearly Chirped Fiber Bragg Gratings // Optics Lett. 2005. Vol. 30, № 17. P. 2203. doi: 10.1364/OL.30.002203

28. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients based on PM-IM Conversion // IEEE Photonics Technology Lett. 2005. Vol. 17, № 10. P. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323

29. Novel Technique for Implementing Incoherent Microwave Photonic Filters with Negative Coefficients using Phase Modulation and Single Sideband Selection / J. Mora, J. Capmany, A. Loayssa, D. Pastor // IEEE Photonics Technology Lett. 2006. Vol. 18, № 18. P. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950

30. Yao J. P., Wang Q. Photonic Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients using a Polarization Modulator // IEEE Photonics Technology Lett. 2007. Vol. 19, № 9. P. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942

Информация об авторах

Таценко Иван Юрьевич – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиofотоника.

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

<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Легкова Татьяна Константиновна – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2019), студентка 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиofотоника.

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

<https://orcid.org/0000-0001-6351-4963>

Иванов Андрей Викторович – начальник отдела АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха". Автор более 70 научных публикаций. Сфера научных интересов – волоконно-оптические активные компоненты, оптоэлектроника, радиofотоника.

Адрес: АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха", ул. Введенского, д. 3, к. 1, Москва, 117342, Россия
E-mail: aviv58@rambler.ru

Устинов Алексей Борисович – доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах, СВЧ-электроника, радиofотоника.

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

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince, J., Regan M., Roussel M. H. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii. 2007, pp. 51–54.

2. Belousov A. A., Vol'khin Yu. N., Gamilovskaya A. V., Dubrovskaya A. A., Tikhonov E. V. Ultra-wideband multifunctional microwave photonic receiving path for analog processing signals decimeter, centimeter and millimeter wavelengths. Microwave electronics and microelectron-

ics conference. 2015, vol. 1, pp. 337–341. (In Russ.)

3. Petrov A. N., Tronev A. V., Lebedev V. V., Il'ichev I. V., Velichko E. N., Shamrai A. V. An Increase in the Transmission Efficiency of an RF Fiber-Optic Line Using the Working Point of an External Modulator Increasing the transmission ratio of microwave photonic path by controlling the operating point of an external modulator *Technical Physics*. 2015, vol. 85, no. 5, pp. 131–136. doi: 10.1134/S1063784215050217 (In Russ.)

4. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator. *Journal of the Optical Society of America B*. 1996, vol. 13, no. 8, pp. 1725–1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725

5. Belkin M. E., Loparev A. V., Semenova Y., Farrell G., Sigov A. S. Tunable RF-band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer-aided design model for its simulation. *Microwave and Optical Technology Lett.* 2011, vol. 53, no. 11, pp. 2474–2477. doi: 10.1002/mopp.26304

6. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2012, vol. 24, pp. 194–196, doi: 10.1109/LPT.2011.2176332.

7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Electronically tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator. *Tech. Phys.* 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1392–1396. doi: 10.1134/S1063784215090224

8. Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Theory of a tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator. *Technical Physics*. 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1397–1401. doi: 10.1134/S1063784215090145

9. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator. *IEEE Magnetics Lett.* 2015, vol. 6, pp. 1–4. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238

10. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. A Microwave Photonic Generator of Chaotic and Noise Signals. *Tech. Phys. Lett.* 2016, vol. 42, no. 4, pp. 403–406. doi: 10.1134/S1063785016040283

11. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. Dynamic modes of microwave signal autogeneration in a radio photonic ring generator. *Technical Physics*. 2017, vol. 62, no. 2, pp. 287–293. doi: 10.1134/S1063784217020153

12. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Self-Generation of Chaotic Microwave Signal in Spin Wave Optoelectronic Generator. *Phys. Solid State*. 2018, vol. 60, no. 11, pp. 2127–2131. doi: 10.1134/S106378341811032X

13. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Lebedev V. V., Petrov A. N., Shamrai A. V., Kalinikos B. A. A Tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics. *J. of Phys.: Conf. Oct.* 2019, vol. 1326, art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015

14. Lelievre O., Crozatier V., Berger P., Baili G., Llopis O., Dolfi D., Nouchi P., Goldfarb F., Bretenaker F., Morvan L., Pillet G. A model for designing ultralow noise single- and dual-loop 10-GHz optoelectronic oscillators. 2017, vol. 35, no. 20, pp. 4366–4374. doi: 10.1109/JLT.2017.2729018

15. Ly A., Auroux V., Khayatzaeh R., Gutierrez N., Fernandez A., Llopis, O. Highly spectrally pure 90-GHz signal synthesis using a coupled optoelectronic. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2018, vol. 30, no. 14, pp. 1313–1316. doi: 10.1109/LPT.2018.2845747

16. Liu A., Yang Y., Song, R., Liu J., Dai J., Tian Z., Xu K. High-performance millimeter-wave synergetic optoelectronic oscillator with regenerative frequency-dividing oscillation. *Optics express*. 2019, vol. 27, no. 7, pp. 9848–9856. doi: 10.1364/OE.27.009848

17. Ghelfi P., Laghezza F., Scotti F., Serafino G., Capria A., Pinna S., Onori D., Porzi C., Scaffardi M., Malacarne A., Vercesi V., Lazzeri E., Berizzi F., Bogoni A. A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*. 2014, vol. 507, iss. 7492, pp. 341–345. doi: 10.1038/nature13078

18. Onori D., Scotti F., Laghezza F., Bartocci M., Zaccaron A., Tafuto A., Albertoni A., Bogoni A., Ghelfi P. A photonically enabled compact 0.5–28.5 GHz RF scanning receiver. *J. of Lightwave Technology*. 2018, vol. 36, no. 10, pp. 1831–1839. doi: 10.1109/JLT.2018.2792304

19. Muniz A. L. M., Noque D. F., Borges R. M., Bogoni A., Hirano M., A. Cerqueira S. Jr. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications. *Microwave and Optical Technology Lett.* 2017, vol. 59, no. 9, pp. 2185–2189. doi: 10.1002/mopp.30704

20. Noque D. F., Borges R. M., Muniz A. L. M., Bogoni A., A. Cerqueira S. Jr. Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier. *Optics Communications*. 2018, vol. 414, pp. 191–194. doi: 10.1016/j.optcom.2018.01.015

21. Xue W., Sales S., Capmany J., Mork J. Wideband 360° microwave photonic phase shifter based on slow light in semiconductor optical amplifiers. *Optics Express*. 2010, vol. 18, pp. 6156–6163. doi: 10.1364/OE.18.006156

22. Sancho J., Lloret J., Gasulla I., Sales S., Capmany J. Fully tunable 360° microwave photonic phase shifter based on a single semiconductor optical amplifier. *Optics Express*. 2011, vol. 19, iss. 18, pp. 17421–17426. doi: 10.1364/OE.19.017421

23. Xue W., Sales S., Mork J., Capmany J. Widely tunable microwave photonic notch filter based on slow and fast light effects. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2009, vol. 21, no. 3, pp. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468

24. Yan Y., Yao J. P. A tunable photonic microwave filter with a complex coefficient using an optical RF phase shifter. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2007, vol. 19, no. 19, pp. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753

25. Yi X., Huang T. X. H., Minasian R. A. Tunable and reconfigurable photonic signal processor with programmable all-optical complex coefficients. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010, vol. 58, no. 11, pp. 3088–3093. doi: 10.1109/TMTT.2010.2076931

26. Song M. H., Torres-Company V., Wu R., Hamidi E., Weiner A. M. Programmable multi-tap microwave photonic phase filtering via optical frequency comb shaping. *Proc. Int. Topical Meet. Microw. Photon. Conf. Singapore, Oct. 18–21, 2011*, pp. 37–40. doi: 10.1109/MWP.2011.6088663

27. Zeng F., Wang J., Yao J. P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on a phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings. Optics Lett. 2005, vol. 30, no. 17, 2203 p. doi: 10.1364/OL.30.002203

28. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on PM-IM conversion. IEEE Photonics Technology Lett. 2005, vol. 17, no. 10, pp. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323

29. Mora J., Capmany J., Loayssa A., Pastor D. Novel

technique for implementing incoherent microwave photonic filters with negative coefficients using phase modulation and single sideband selection. IEEE Photonics Technology Lett. 2006, vol. 18, no. 18, pp. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950

30. Yao J. P., Wang Q. Photonic microwave bandpass filter with negative coefficients using a polarization modulator. IEEE Photonics Technology Lett. 2007, vol. 19, no. 9, pp. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942

Information about the authors

Ivan Yu. Tatsenko, Master degree in electronics and nanoelectronics (2020), post graduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5, Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Tat'yana K. Legkova, Bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2019), the 2st year master degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics.

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

Andrey V. Ivanov, Head of Department, POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: fiber-optic components, optoelectronics, microwave photonics.

Address: POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company, 3, Bld. 1, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia

E-mail: aviv58@rambler.ru

Alexey B. Ustinov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2012), Associate Professor (2010) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: linear and non-linear properties of magnetic oscillations and waves in ferromagnetic films and layered structures on their basis; microwave devices, microwave photonics.

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

E-mail: ustinov_rus@yahoo.com

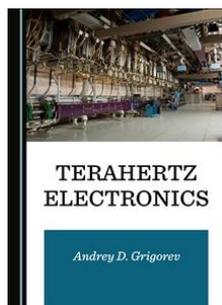
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ



Andrey D. Grigoriev

Terahertz Electronics



ISSN-13: 978-1-5275-5432-0

ISSN-10: 1-5275-5432-5

Date of Publication: 01/09/2020

Pages / Size: 340 / A5

Copyright for the English version is with the authors.

Cambridge Scholars Publishing 2020

The book describes distinctive features of the terahertz radiation interaction with various materials, including the Earth's atmosphere, liquids, dielectrics, superconductors, semiconductors, metals and 2D-structures. It discusses all types of terahertz sources, including lasers, photoconductive antennas, semiconductor diode and transistor generators and amplifiers, and considers terahertz band vacuum devices. The text offers a comparative analysis of these devices and their perspective in the terahertz band, and describes the basic types of terahertz detectors. Also investigated here are the reasons for the appearance of the so-called "terahertz gap" and the means of increasing working frequency and output power of the sources of terahertz radiation. The book also considers the electromagnetics and electron-optical systems of vacuum terahertz devices and their manufacturing technology.

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

УДК 532.591+519.653

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65>

Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных буйев традиционной формы

К. А. Глеб^{1, 2✉}

¹ФГУП "Крыловский государственный научный центр", Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉kostya_gleb@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время волномерные буйи (ВБ) повсеместно применяются для измерения статистических и спектральных параметров волн. Современные методы определения пространственного спектра волн используют их представление рядом Фурье, коэффициенты которого определяются по измерениям волновых процессов. Конструктивное исполнение современных ВБ позволяет измерять ординаты волн и углы волнового склона, чего достаточно для определения пяти членов ряда Фурье. Однако по измерениям волновой поверхности можно определить до девяти членов ряда. Для определения недостающих четырех членов необходима информация о кривизне волн. Отсутствие этой информации приводит к низкой разрешающей способности метода и к наличию в спектре отрицательных областей.

Цель работы. Разработка метода определения кривизны волн по измерениям ординат волн и углов волнового склона ВБ традиционной формы.

Методы и материалы. Приведены теоретические обоснования предложенного метода, представлено математическое моделирование нерегулярных волновых процессов в широком диапазоне интенсивности волн и экспериментальное исследование трех спектров волнения с трехкратным повтором каждого из них.

Результаты. Разработан метод определения кривизны волн по измерениям ВБ традиционной формы посредством численного дифференцирования результатов измерений углов волнового склона с использованием информации о скорости распространения волн. Метод дополнен корректировкой амплитудных значений по критерию соответствия спектральных характеристик волновых процессов. Моделирование показало хорошее совпадение расчетной кривизны с заданными значениями. Отклонение по дисперсии составило менее 1 %. Экспериментальное исследование показало большее отклонение по дисперсии – до 9 %, что можно объяснить инструментальной погрешностью и неучтенным влиянием отраженных волн.

Заключение. Отличительной особенностью метода является использование измерений ординат волн и углов волнового склона, выполненных ВБ традиционной формы без дополнительных конструктивных элементов. Необходимы дополнительные исследования метода для определения влияния других факторов волнения (крутизны волн, ширины спектра, трехмерной структуры волны и т. д.) на результаты определения кривизны и пространственного спектра.

Ключевые слова: волномерный буй, пространственный спектр, кривизна волн, скорость волн, численное дифференцирование, преобразование Фурье

Для цитирования: Глеб К. А. Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных буйев традиционной формы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 57–65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65

Источник финансирования: Инициативная работа. Грант Правительства Российской Федерации 08-08.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.07.2020; принята к публикации после рецензирования 17.08.2020; опубликована онлайн 29.09.2020

© Глеб К. А., 2020



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

Method for Determining the Sea Waves Curvature Using Wave Buoys Conventional Shape

K. A. Gleb^{1,2✉}

¹Krylov State Research Centre, St Petersburg, Russia

²ITMO University, St Petersburg, Russia

✉ kostya_gleb@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern wave buoys due to their design make it possible to determine a directional wave spectrum using five coefficients of the Fourier series. However, up to nine members of the series can be determined from wave surface measurements. To determine the missing four members, information about wave curvature is necessary. It cannot be obtained by direct measurements with wave buoys of a conventional shape - a sphere, a cylinder or a saucer. The lack of information about the curvature of waves when determining the directional spectrum leads to its low resolution and to the presence of negative regions.

Aim. To develop a method for determining the curvature of waves from measurements with conventional shape wave buoys.

Materials and methods. Theoretical substantiations of the proposed method were presented, as well as mathematical modeling of irregular wave processes in a wide range of wave intensities and an experimental study of three wave spectra with a threefold repetition of each of them.

Results. Numerical simulations demonstrated a good agreement between the calculated curvature and the set values. The variance deviation was less than 1%. The experimental study demonstrated a greater deviation in variance - up to 9%, which can be explained by the influence of an instrumental error and by an unaccounted influence of reflected waves.

Conclusion. On the basis of the study, the method for determining the curvature of waves by numerical differentiation of wave slope measurements using information on a wave propagation speed has been developed. The method was supplemented by correcting amplitude values according to the criterion of matching the spectral characteristics of wave processes. Additional studies of the developed method are required to determine the influence of wave factors such as wave steepness, spectrum width, random multidirectional waves, etc. on the calculated curvature and on the directional spectrum.

Keywords: wave buoy, directional spectrum, wave curvature, wave speed, numerical differentiation, Fourier transform

For citation: Gleb K. A. Method for Determining the Sea Waves Curvature Using Wave Buoys Conventional Shape. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 57–65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65

Source of financing: Initiative work.

Conflict of interest. Author declares no conflict of interest. Grant of The Government of the Russian Federation 08-08.

Submitted 29.07.2020; accepted 17.08.2020; published online 29.09.2020

Введение. Измерение параметров морского волнения и контроль нарастания его интенсивности необходимы для решения задач безопасности и экономической эффективности различных техногенных объектов, таких, как морские платформы добычи углеводородов, плавучие заводы сжиженного природного газа, порты и др. Актуальность контрольных измерений обусловлена возможностью возникновения аварийной ситуа-

ции в случае превышения высотой волны допустимого значения, при котором может произойти разрушение технических средств. Безопасность этих объектов зависит от оценки текущего состояния морского волнения и его прогнозирования, которые невозможны без прямых измерений взволнованной поверхности. Непрерывные наблюдения волновой обстановки позволяют повысить точность и продолжительность прогнозов.

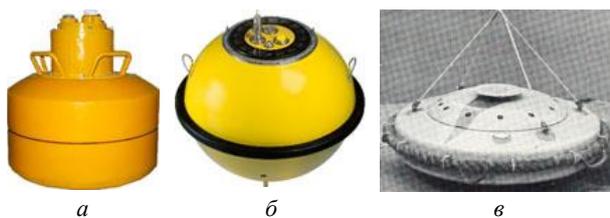


Рис. 1. ВБ традиционной формы: а – цилиндрический ВБ "Шторм"; б – шарообразный ВБ "Waverider"; в – блинновидный ВБ Лонге-Хиггинса

Fig. 1. Wavebuoys with conventional shapes: а – cylinder shaped buoy "Storm"; б – sphere shaped buoy "Waverider"; в – saucer shaped buoy of Longuet-Higgins

Ключевым средством контроля морского волнения являются волномерные буи (ВБ). Большинство ВБ предназначено для измерения только возвышений волновой поверхности, что позволяет определять лишь статистические параметры волнения (высоту, период волн, интенсивность). Однако для получения информации об угловом распределении энергии волн необходимо знать пространственный спектр [1], который можно получить по измерениям ординат волн и пространственных производных в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с привязкой к сторонам света. Такими пространственными производными являются угол волнового склона и кривизна волн. Проблема заключается в том, что все современные ВБ, имеющие традиционную форму шара, цилиндра или блина (рис. 1), не способны измерять кривизну волн, информация о которой необходима для достоверного определения пространственного спектра последних.

Для измерения кривизны волн необходимы ВБ, выполненные по трехточечной (клеверовидной) схеме (рис. 2). Однако последние упоминания об использовании таких буев датированы 1979 г. [2].

Методы описания пространственного спектра морской поверхности по измерениям ВБ отражены в трудах А. А. Свешникова [3] и М. Лонге-Хиггинса [1], которые предложили представлять пространственный спектр (рис. 3) рядом Фурье:

$$S(\omega, \theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)],$$

где ω – круговая частота волн; θ – географическое направление бега волн;

$$a_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \cos(n\theta) d\theta,$$



Рис. 2. Клеверовидный ВБ, способный измерять кривизну волн

Fig. 2. Clover leaf buoy that can measure wave curvature

$$b_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \sin(n\theta) d\theta$$

– коэффициенты ряда Фурье.

В вычислительных алгоритмах современных ВБ коэффициенты a_n и b_n определяются через корреляционные функции ординат волн и углов волнового склона. Недостаток измерительной информации о кривизне волн приводит к грубому приближению пространственного спектра к действительному, в частности к появлению в спектре волн отрицательных областей (рис. 4), что противоречит физике процесса и несоответствию плоского и пространственного спектров, которые взаимосвязаны следующим соотношением:

$$S_{\zeta}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta,$$

где $S_{\zeta}(\omega)$ – плоский спектр волн; $S_{\zeta}(\omega, \theta)$ – пространственный спектр волн.

Для устранения этих недостатков в современных ВБ применяют дополнительные методы математической обработки [4], такие, как метод максимального правдоподобия [6] и др. [7, 8]. С одной стороны, указанные методы позволяют в некоторых случаях избавиться от отрицательных областей спектра и повысить разрешающую способность по угловому распределению [9], с другой – приводят к появлению вторых, ложных пиков в спектре [4, 10], что может привести к ошибочной его интерпретации как второго направления бега волн с большой энергией. Это может повлиять на оценку текущей волновой обстановки и на рост погрешности прогнозирования волнения. Таким об-

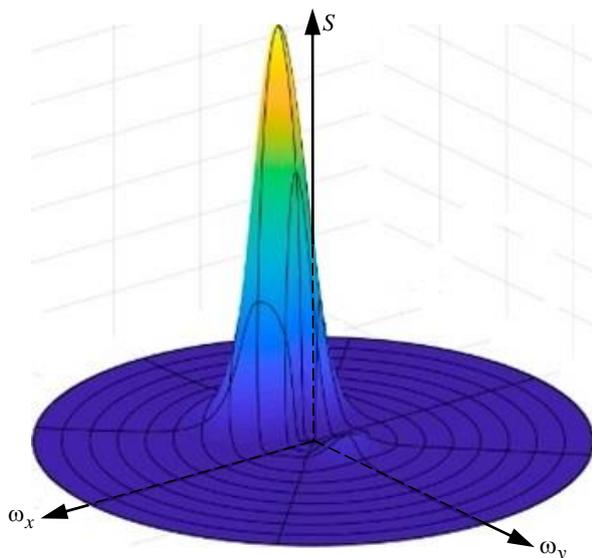


Рис. 3. Пример пространственного спектра морского волнения

Fig. 3. An example of the spatial spectrum of sea waves

разом, проблема достоверного определения пространственного спектра трехмерного волнения остается актуальной по настоящее время. Для ее решения необходим метод, позволяющий косвенным образом определить кривизну волн при помощи ВБ традиционной формы.

Методы. Кривизна волновой поверхности является второй пространственной производной ординат волн и первой производной углов волнового склона:

$$\zeta_x'' = \frac{\partial^2 \zeta(x, y, t, \theta)}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos^2 \theta \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varphi),$$

где ζ – ордината волн; x, y – пространственные координаты; t – время; A – амплитуда волн; k – волновое число; φ – случайная фаза.

Приведенное выражение справедливо для аналитической записи кривизны в виде непрерывной гладкой кривой. Однако реальные средства измерения, такие, как ВБ, регистрируют процессы волнения в виде дискретных значений. В этом случае дифференцирование необходимо выполнять численным способом по приращению пространственной координаты dx , т. е. по смещению волны за один шаг опроса dt :

$$dx = v_{\varphi} dt = \left[\frac{1}{2\pi} \right] g \tau dt,$$

где $v_{\varphi} = \left[\frac{1}{2\pi} \right] g \tau$ – фазовая скорость волн; g – ускорение свободного падения; τ – период волн.

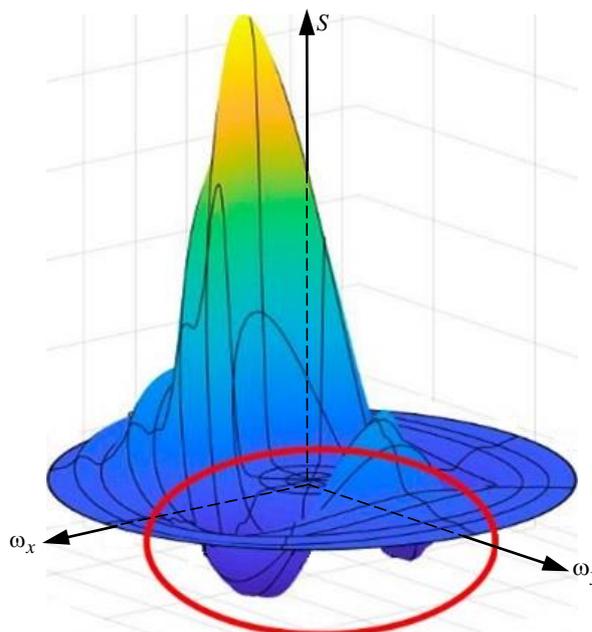


Рис. 4. Пример пространственного спектра морского волнения, построенного по пяти членам ряда Фурье

Fig. 4. An example of the spatial spectrum of sea waves calculated with 5 Fourier series coefficients

С учетом метода конечных разностей выражение для дискретных значений кривизны примет следующий вид:

$$\zeta_x'' = \frac{2\pi(\zeta'_{x_{i+1}} - \zeta'_{x_{i-1}})}{(t_{i+1} - t_{i-1})gt}, \quad (1)$$

где ζ'_x – угол волнового склона по оси x ; i – порядковый номер зарегистрированного дискретного значения величины.

Такой подход применим к определению кривизны регулярных и нерегулярных волн. По реализации ординат регулярной волны можно однозначно определить ее период, который будет постоянным для всей реализации, а значит, постоянным будет и смещение dx . В этом случае при расчете кривизны по (1) получится гладкая кривая с близкими к истинным значениями. Однако если волнение нерегулярное, возникает неопределенность определения периода волн, поскольку каждая волна будет иметь свой период, а значит, и свою скорость. Проблема усугубляется тем, что периоды кривизны смещены в более высокочастотную область относительно периодов ординат волн, что отражает соотношение их спектральных плотностей:

$$S_{\zeta''} = k^2 S_{\zeta'} = k^4 S_{\zeta}, \quad (2)$$

где $S_{\zeta''}$ – спектр кривизны; $S_{\zeta'}$ – спектр углов волнового склона; S_{ζ} – спектр ординат.

Это означает, что в момент времени, когда ордината волны равна нулю (при пересечении нулевой линии), углы волнового склона или кривизны имеют ненулевые значения. В том случае, если соседние периоды волн отличаются друг от друга, расчетное значение скорости может резко изменяться, что приведет к скачкообразному изменению расчетного значения кривизны. В результате в расчетной временной зависимости кривизны возникают скачкообразные выбросы (рис. 5).

Чтобы устранить эти выбросы, можно использовать не скорость отдельно взятой волны, а среднюю скорость всех волн в зарегистрированной реализации. При этом необходимо выполнить корректировку амплитудных значений по методу обратной связи [11], чтобы минимизировать отклонения расчетных значений кривизны от истинных из-за несоответствия средней скорости волн и скорости волн каждой отдельной волны. В основе идеи метода корректировки амплитудных значений кривизны лежит (2), связывающее спектры процессов волн. Рассчитав реализацию кривизны по (1) с использованием средней скорости волн, необходимо определить ее спектр. Затем необходимо определить спектр по реализации углов волнового склона и в соответствии с (2) умножить его на k^2 и получить теоретический спектр кривизны. Затем оба спектра кривизны можно сравнить между собой и определить, на каких частотах амплитудные значения расчетной кривизны отличаются от теоретических. Для сохранения частотных и фазовых распределений гармоник вместо спектральных плотностей целесообразно использовать преобразования Фурье

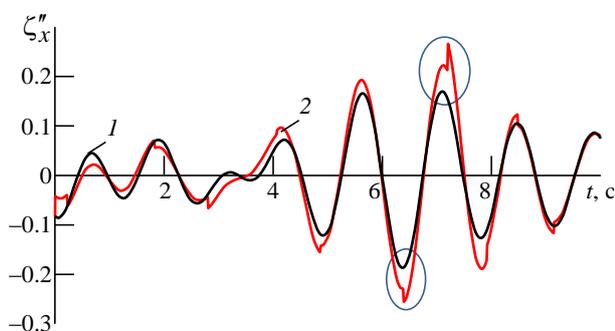


Рис. 5. Заданная (1) и расчетная (2) кривизна нерегулярной волны. Овалами отмечены выбросы расчетных значений

Fig. 5. The given (1) and calculated (2) curvature of the irregular wave. Ovals mark outliers of calculated values

временных реализаций. При этом необходимо учесть, что в (2) при $S_{\zeta'}$ волновое число будет стоять в первой степени, а при S_{ζ} – в квадрате.

Следует отметить, что указанные теоретические обоснования метода справедливы при допущении, что волнение рассматривается в рамках линейной теории как стационарный эргодический процесс, а глубина акватории не учитывается.

Разработанный метод был проверен численным моделированием в программе MatLab и экспериментально в опытовом волновом бассейне. В ходе численного моделирования формировались реализации нерегулярных волн (ординаты, углы и кривизна) по формулам:

$$\begin{aligned} \zeta(x, t) &= \sum_{i=1}^n A_i \cos(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i); \\ \zeta'(x, t) &= \partial \zeta(x, t) / \partial x = \\ &= -\sum_{i=1}^n A_i k \cos \theta \sin(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i); \quad (3) \\ \zeta''(x, t) &= \partial^2 \zeta(x, t) / \partial x^2 = \\ &= -\sum_{i=1}^n A_i k^2 \cos^2 \theta \cos(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i), \end{aligned}$$

где $A_i = \sqrt{2S_P(\omega)(\omega_{i+1} - \omega_i)}$ – амплитуды i -х волн, причем $S_P(\omega)$ – спектр Пирсона–Московица [12].

Затем по разработанному методу по реализациям ординат волн и углов волнового склона рассчитывались кривизны волн с корректировкой амплитудных значений. Обе реализации кривизны сравнивались между собой по дисперсии, поскольку этот параметр связан с энергией процесса волнения:

$$\delta = \pm \left| \frac{D(\zeta'') - D(\zeta''_M)}{D(\zeta''_M)} \right| 100\%, \quad (4)$$

где $D(\zeta'')$ – дисперсия заданной реализации кривизны; $D(\zeta''_M)$ – дисперсия реализации кривизны, полученной по разработанному методу.

Режимы моделировались в диапазоне интенсивности волн от 1 до 9 баллов (высоты волн 3 % обеспеченности от 0.2 до 12.0 м, периоды волн от 2.08 до 12.76 с. Под высотой волн 3 % обеспеченности понимается такая высота волны, вероятность превышения которой другими волнами в реализации составляет 3 %.



Рис. 6. Моделируемое волнение в опытовом волновом бассейне

Fig. 6. Simulated Waves in the Experimental Wave Pool

Табл. 1. Характеристики воспроизводимых спектров Пирсона–Московица в опытовом волновом бассейне

Table 1. Characteristics of the Pearson–Moskovitz spectra Modeled in the Experimental Wave Basin

Высота волн трехпроцентной обеспеченности h_3 , мм	Период волн, соответствующий частоте максимума спектра волнения T_p , с
120	1.50
150	1.68
200	1.95

Экспериментальное исследование проводилось в опытовом волновом бассейне ФГУП "Крыловский государственный научный центр", в котором моделировались нерегулярные волны (рис. 6) с характеристиками, представленными в табл. 1. Каждый режим волнения повторялся по 3 раза.

Для регистрации ординат волн, углов волнового склона и кривизны волн использовался специально созданный для этой задачи электролитический волнограф (рис. 7) [13], содержащий 9 пар струн с расстоянием 150 мм между парами. Использование волнографа вместо ВБ или его масштабной модели обусловлено меньшим значением инструментальной погрешности. Волнографы были калиброваны, погрешность измерения волн в каждой точке волнографа составила не более $\pm 1.9\%$.

Методика сравнения результатов инструментальных измерений кривизны волн и расчетных значений аналогична методике математического моделирования.

Результаты. Предложенные решения позволили избавиться от выбросов расчетных реализаций кривизны и получить значения, близкие к искомому (рис. 8). На рисунке отчетливо видно, что кривизна,



Рис. 7. Струнный электролитический волнограф с девятью парами струн для экспериментального исследования разработанного метода

Fig. 7. String electrolytic wave recorder with 9 pairs of strings for experimental study of the developed method

рассчитанная по методу с корректировкой амплитудных значений, практически совпадает с искомой кривизной. Отношение дисперсий заданной и расчетной кривизны, рассчитанное по (4), составляет не более 0.83% в диапазоне интенсивности волн от 1 до 9 баллов (b – интенсивность волн, баллы) (рис. 9).

Результаты обработки экспериментальных данных показали, что максимальное отклонение дисперсии кривизны (табл. 2), полученной по разработанному методу, от заданных значений составило 9.27% . Необходимо отметить, что погрешность возрастала с уменьшением высот и периодов моделируемых волн. Пример полученных реализаций кривизны волн представлен на рис. 10.

Заключение. В результате исследований предложен метод определения кривизны морских волн, заключающийся в численном дифференцировании временной реализации углов волнового склона с корректировкой амплитудных значений на основа-

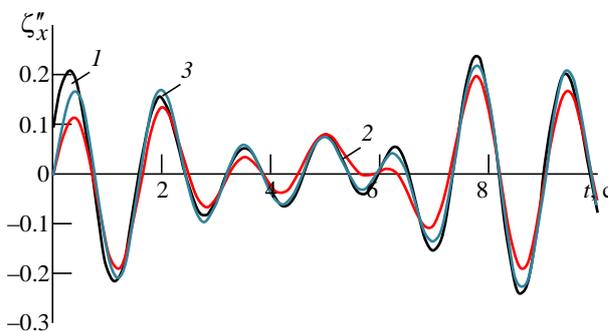


Рис. 8. Коррекция кривизны нерегулярных волн: 1 – заданная кривизна по (3); 2 – расчетная кривизна без коррекции; 3 – расчетная кривизна с коррекцией

Fig. 8. Irregular wave curvature correction: 1 – a given curvature to (3); 2 – calculated curvature without correction; 3 – calculated curvature corrected according

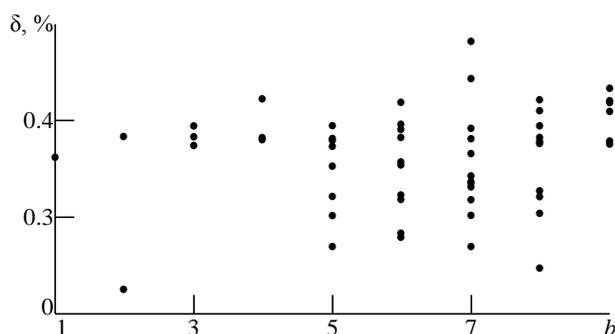


Рис. 9. Отношение дисперсий заданной и расчетной кривизны для промоделированных режимов нерегулярного волнения

Fig. 9. The ratio of variances of a given and calculated curvature for simulated irregular waves

Табл. 2. Результат обработки экспериментальных данных

Table 2. The result of processing of the experimental data

Высота волн трехпроцентной обеспеченности h_3 , мм/мм	Период максимумов спектра волнения τ_p , с	Эксперимент		
		1	2	3
120	1.50	9.27	7.58	8.17
150	1.68	6.91	7.05	6.13
200	1.95	4.95	5.53	5.20

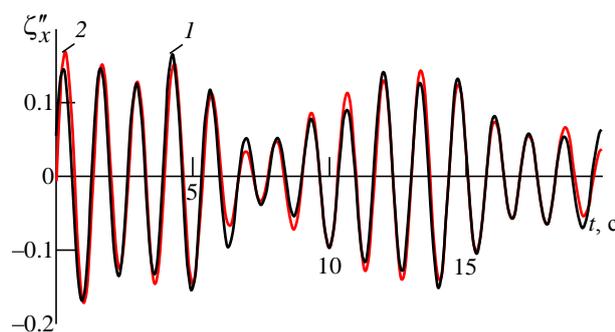


Рис. 10. Пример кривизны реализаций нерегулярной волны, полученных в ходе экспериментального исследования: 1 – заданная кривизна, 2 – расчетная кривизна

Fig. 10. An example of the curvature of the irregular wave realizations obtained during the experimental study:

1 – given curvature, 2 – calculated curvature

нии совпадения спектральных плотностей волновых процессов. Численное и экспериментальное моделирование показало работоспособность разработанного метода. С учетом принятых допущений полученное значение отношения дисперсии расчетной кривизны к заданной составило 0.83 %.

Экспериментальное исследование показало отношение, практически на порядок большее: от 4.95 до 9.27 %, что можно объяснить инструментальной погрешностью струнного волнографа. По причине того, что заданные реализации углов волнового склона и кривизны волн получены косвенным методом, так как рассчитывались по реализациям ординат волн, полученным в девяти точках, погрешности измерений арифметически суммировались, поскольку регистрируемые процессы коррелируемы. Кроме того, большое влияние на расчет кривизны могли оказать волны ряби, отраженные от стен и колонн бассейна. Подтверждением этого является то, что при исследовании волн отношение дисперсий с ростом интенсивности волнения снижается.

Полученные результаты показывают, что разработанный метод определения кривизны волн при помощи ВБ традиционной формы работоспособен. Метод применим в современных ВБ, например в ВБ "Шторм" [14], а также с небольшими группами струнных волнографов [15] для определения пространственного спектра по девяти членам ряда Фурье. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования метода в части влияния иных факторов, таких, как крутизна волн, ширина спектра, наличие трехмерных волн и т. д. Кроме того, целесообразно изучить влияние погрешности определения кривизны волн на погрешность получения их пространственного спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves using the Motions of a Floating Buoy // Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton, USA, May 1–4, 1961. New York: Prentice-Hall, 1963. P. 111–132, doi: 10.1016 /0011-7471(65)91457-9

2. Observation of the Power Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy / H. Mitsuyasu, F. Tsai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda, K. Rikiishi // J. of

Physical Oceanography. 1979. Vol. 10, iss. 2. P. 286–296. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0286:ootpso>2.0.co;2

3. Свешников А. А. Определение вероятностных характеристик трехмерного волнения моря // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Механика и машиностроение. 1959. № 3. С. 32–41.

4. Earle M. D., Steele K. E., Wangc D. W. C. Use of Advanced Directional Wave Spectra Analysis Methods // Ocean Engineering. 1998. Vol. 26, iss. 12. P. 1421–1434. doi: 10.1016/S0029-8018(99)00010-4.

5. Hashimoto N., Kobune K. Estimation of Directional Spectra from the Maximum Entropy Principle // Proc. 5th Int. Offshore Mech. and Arct. Eng. Symp., Tokyo, Japan. British Maritime Technology: London, 13–18 Apr. 1986. Vol. 1. P. 80–85.

6. Krogstad H. E. Maximum Likelihood Estimation of Ocean Wave Spectra from General Arrays of Wave Gauges // Modeling, identification and control. 1988. Vol. 9, № 2. P. 81–97. doi: 10.4173/mic.1988.2.3.

7. Benoit M., Frigaard P., Schäffer A. Analysing Multidirectional Wave Spectra: Alternative Classification of Available Methods // Proc. 27th IAHR Congress, Seminar on Multidirectional Waves and their Interaction with Structures, San Francisco, USA, 10–15 Aug. 1997. Ottawa: Canadian Government Publishing, 1997. P. 131–158.

8. Plant W. J., Donelan M. A. Directional Surface Wave Spectra from Point Measurements of Height and Slope // J. Atmos. Oceanic Technol. 2020. Vol. 37, № 1. P. 67–83. doi: 10.1175/JTECH-D-19-0128.1

9. Gorman R. M. Estimation of Directional Spectra from Wave Buoys for Model Validation // Procedia IUTAM. 2018. Vol. 26. P. 81–91. doi: 10.1016/j.piutam.2018.03.008.

10. Kim T., Lin L., Wang H. Comparisons of Directional Wave Analysis Methods // Waves'93. Ocean Wave Measurement and Analysis: Proc. of the 2nd Intern. Symp., New Orleans,

USA, 25–28 July 1993. New York: American Society of Civil Engineers, 1993. P. 554–568.

11. Глеб К. А., Грязин Д. Г. Применение стохастического метода управления при исследовании алгоритма расчета характеристик волнения // Всерос. науч. конф. по проблемам управления в технических системах, Санкт-Петербург, 30 окт. – 01 нояб. 2019 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. Т. 1. С. 268–270.

12. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii // J. of Geophysical Research. 1964. Vol. 69, iss. 24. P. 5181–5190. doi: 10.1029/JZ069i024p05181

13. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 255 с.

14. Волномерный буй "Шторм" с инерциальным микромеханическим измерительным модулем. Результаты разработки и испытаний / Д. Г. Грязин, Л. П. Старосельцев, О. О. Белова, К. А. Глеб // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 667–674. doi: 10.7868/s0030157417040165

15. Dimitra I. M., Constantine D. M., Michalis K. C. A Simple Method for Obtaining Wave Directional Spreading // J. of Applied Water Engineering and Research. 2017. Vol. 5, iss. 2. P. 129–141. doi: 10.1080/23249676.2016.1172270

Информация об авторах

Глеб Константин Андреевич – начальник сектора ФГУП "Крыловский государственный научный центр", аспирант Университета ИТМО. Автор восьми научных работ. Сфера научных интересов – волновые процессы в морях и океанах, измерение спектральных параметров волн.
Адрес: ФГУП "Крыловский государственный научный центр", Московское ш., д. 44, Санкт-Петербург, 196158, Россия
E-mail: kostya_gleb@mail.ru

References

1. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves using the Motions of a Floating Buoy. Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton, USA, May 1–4, 1961. New York: Prentice-Hall, 1963, pp. 111–132. doi: 10.1016/0011-7471(65)91457-9

2. Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Ohkusu M., Honda T., Rikiishi K. Observation of the Power Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. J. of Physical Oceanography, 1979, vol. 10, iss. 2, pp. 286–296. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0286:ootps>2.0.co;2

3. Sveshnikov A. A. Determination of the Probabilistic Characteristics of Three-Dimensional Sea Waves. *Izv. AN USSR. Otd. Tech. nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Izv. Academy of Sciences of the USSR. OTN Mechanics and mechanical engineering]. 1959, no. 3, pp. 32–41. (In Russ.)

4. Earle M. D., Steele K. E., Wang D. W. C. Use of Advanced Directional Wave Spectra Analysis Methods. Ocean Engineering, 1998, vol. 26, iss. 12, pp. 1421–1434. doi: 10.1016/S0029-8018(99)00010-4

5. Hashimoto N., Kobune K. Estimation of Directional Spectra from the Maximum Entropy Principle. Proc. 5th

Int. Offshore Mech. and Arct. Eng. Symp., Tokyo, Japan, 13–18 Apr., British Maritime Technology, London U.K., 1986, vol. 1, pp. 80–85.

6. Krogstad H. E. Maximum Likelihood Estimation of Ocean Wave Spectra from General Arrays of Wave Gauges. Modeling, identification and control. 1988, vol. 9, no. 2, pp. 81–97. doi: 10.4173/mic.1988.2.3

7. Benoit M., Frigaard P., Schäffer A. Analysing Multidirectional Wave Spectra: Alternative Classification of Available Methods. Proc. 27th IAHR Congress, Seminar on Multidirectional Waves and their Interaction with Structures, San Francisco, USA, 10–15 Aug. 1997, Canadian Government Publishing, 1997, pp. 131–158.

8. Plant W. J., Donelan M. A. 2020: Directional Surface Wave Spectra from Point Measurements of Height and Slope. J. Atmos. Oceanic Technol. 2020, vol. 37, no. 1, pp. 67–83. doi: 10.1175/JTECH-D-19-0128.1

9. Gorman R. M. Estimation of Directional Spectra from Wave Buoys for Model Validation. Procedia IUTAM, 2018, vol. 26, pp. 81–91. doi: 10.1016/j.piutam.2018.03.008

10. Kim T., Lin L., Wang H. Comparisons of Directional Wave Analysis Methods. Proc. of the Second Int. Symposium

on Ocean Wave Measurement and Analysis New Orleans, USA, 25–28 July, 1993. American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1994, pp. 554–568.

11. Gleb K. A., Gryazin D. G. Application of the Stochastic Control Method in the Study of the Algorithm for Calculating Wave Characteristics. *Vseross. nauchnaya konf. po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh* [Russian scientific conf. on control problems in technical systems]. 30 Oct. – 01 Nov., 2019, St Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2019, vol. 1, pp. 268–270. (In Russ.)

12. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. of Geophysical Research*. 1964,

vol. 69, iss. 24, pp. 5181–5190. doi: 10.1029/JZ069i024p05181

13. Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Waves in the World's Oceans]. L. Gidrometeoizdat, 1985, 255 p. (In Russ.)

14. Gryazin D. G., Starosel'tsev L. P., Belova O. O., Gleb K. A. *Volnomernyi bui "Shtorm" s inertzial'nym mikromekhanicheskim izmeritel'nym modulem. Okea-nologiya* [Oceanology]. 2017, vol. 57, no. 4. pp. 667–674. doi: 10.7868/s0030157417040165 (In Russ.)

15. Dimitra I. M., Constantine D. M., Michalis K. C. A Simple Method for Obtaining Wave Directional Spreading. *J. of Applied Water Engineering and Research*. 2017, vol. 5, iss. 2, pp. 129–141. doi: 10.1080/23249676.2016.1172270

Information about the author

Konstantin A. Gleb, Head of sector in Krylov State Research Centre, post graduate student in ITMO University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: ocean and sea waves and spectral characteristics. Address: Krylov State Research Centre, 44 Moskovskoe Ave., St Petersburg 196158, Russia
E-mail: kostya_gleb@mail.ru

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

УДК 004.93+535.8

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-66-76>

Сравнение алгоритмов для шумоподавления изображений оптической когерентной томографии меланомы кожи

О. О. Мякинин

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

myakole@gmail.com

Аннотация

Введение. Оптическая когерентная томография (ОКТ) – неинвазивный инструмент для исследования оптически неоднородных сред с микронной точностью, включая онкологию кожи. Однако ОКТ-изображения тканей сильно зашумлены, что усложняет как экспертную, так и автоматическую оценку изображений. В литературе почти отсутствуют систематические сравнения алгоритмов шумоподавления.

Цель работы. Получить результаты сравнительного тестирования на наборе ОКТ-изображений меланомы кожи с помощью различных алгоритмов шумоподавления.

Материалы и методы. Описан ряд алгоритмов шумоподавления, в которые входят как 2 относительно простых классических алгоритма – винеровский и медианный, так и более сложные: комплексный диффузионный фильтр (Complex Diffusion Filter – CDF), нечеткий анизотропный диффузионный интервальный фильтр второго типа (Interval Type Two Fuzzy Anisotropic Diffusion Filter – ITTFADF) и фильтр на основе эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD), предложенный ранее автором для визуализации сеточных имплантов. Определены количественные метрики: отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR), эффективное число наблюдений (Effective Number of Looks – ENL), индекс структурного сходства и коэффициент корреляции χ , отражающие 2 основных выбранных принципа улучшения качества изображения: уменьшение шума и сохранность границ слоев ткани и неоднородностей.

Результаты. Получены результаты сравнительного тестирования на наборе изображений, состоявшем из 10 меланом, к которым были применены различные алгоритмы шумоподавления.

Заключение. Исследование не выявило лучший алгоритм по всем четырем метрикам. По метрике SNR лучше всего работают EMD-фильтр и CDF в зависимости от типа области. EMD-фильтр при этом либо лучший по всем признакам, либо уступает на неоднородных областях по SNR и занял второе место по ENL. Приняв за верную гипотезу о большей значимости сохранности границ перед интегральной оценкой шума, можно сделать однозначный вывод о необходимости использования именно EMD-фильтра. В качестве альтернативы EMD-фильтру можно рекомендовать использовать винеровский фильтр (выигрывающий на индексах сохранности границ) или ITTFADF, который занял третье место по всем используемым метрикам.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, диффузионный фильтр, медианный фильтр, винеровский фильтр, нечеткая логика, эмпирическая модовая декомпозиция.

Для цитирования: Мякинин О. О. Сравнение алгоритмов для шумоподавления изображений оптической когерентной томографии меланомы кожи // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 66–76. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-66-76

Источник финансирования: Инициативная работа.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.06.2020; принята к публикации после рецензирования 14.08.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



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

Comparison of Noise Reduction Algorithms for Optical Coherence Tomography Images of Skin Melanoma

O. O. Myakinin

Samara National Research University, Samara, Russia

myakole@gmail.com

Abstract

Introduction. Optical coherence tomography (OCT) is a non-invasive instrument for studying optically heterogeneous media with micron precision, including skin cancer. However, OCT tissue images are very noisy. It complicates both expert and automated image evaluations. There are almost no systematic comparisons of noise reduction algorithms in the literature.

Objective. To obtain comparative test results on a set of OCT images of skin melanoma using various noise reduction algorithms.

Materials and methods. A number of noise reduction algorithms were described, which include two relatively simple classical algorithms: Wiener and median, and more complex ones: a Complex Diffusion Filter (CDF), an Interval type-II Fuzzy Anisotropic Diffusion Filter (ITTFADF) and an Empirical Mode Decomposition (EMD) filter, previously proposed by the author for visualizing of mesh implants. Quantitative metrics were determined: a Signal-to-Noise Ratio (SNR) metrics, an Effective Number of Looks (ENL) metrics, Structural Similarity Index Metrics (SSIM) and a correlation coefficient χ , reflecting two main principles of improving image quality: to reduce noise and to save the borders of tissue layers and heterogeneities.

Results. The results of a comparative testing on a set of images, consisting of 10 melanomas (to which various noise reduction algorithms were applied) were obtained.

Conclusion. The study did not reveal the best algorithm for all four metrics. According to the SNR metric, the EMD and the CDF filters perform the best depending on the type of area. At the same time, the EMD filter is either the best in all respects, or is inferior in SNR in heterogeneous areas and takes the second place in ENL. Taking as the correct hypothesis that the border preservation is more important before an integral noise estimate, it is possible to make an unambiguous conclusion about the need to use the EMD filter. As an alternative to the EMD filter, Wiener filter (which wins on the border preservation metrics) should be used or the ITTFADF, which ranked third in all used metrics.

Keywords: optical coherence tomography, diffusion filter, median filter, Wiener filter, fuzzy logic, empirical mode decomposition

For citation: Myakinin O. O. Comparison of Noise Reduction Algorithms for Optical Coherence Tomography Images of Skin Melanoma. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 66–76. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-66-76

Source of financing: Initiative work.

Conflict of interest. Author declares no conflict of interest.

Submitted 29.06.2020; accepted 14.08.2020; published online 29.09.2020

Введение. Оптическая когерентная томография (ОКТ) – неинвазивный высокопроизводительный инструмент для исследования оптически неоднородных сред с микронной точностью [1], в том числе с достаточно широким применением в онкологии [2], включая онкологию кожи [3].

Сформированные с помощью ОКТ изображения тканей сильно зашумлены, что усложняет как экспертную, так и автоматическую оценку изображений, так как спекл-шумы маски-

руют границы слоев ткани и неоднородностей, усложняя их обнаружение. Первоначально для шумоподавления использовались статистические техники, наследованные из спекл-визуализации [4–6]. Затем перешли к использованию более адаптированных к решаемой задаче алгоритмов. Однако в литературе уделяется мало внимания сравнению этих подходов. Обычно предлагаемый метод сравнивается с классическими подходами к снижению влияния шумов.

В настоящей статье проведено сравнительное тестирование пяти алгоритмов шумоподавления на наборе ОКТ-изображений меланомы кожи. Рассмотрены 2 относительно простых классических алгоритма – винеровский и медианный, а также более сложные: комплексный диффузионный фильтр (Complex Diffusion Filter – CDF) [7], нечеткий анизотропный диффузионный интервальный фильтр второго типа (Interval Type Two Fuzzy Anisotropic Diffusion Filter – ITTFADF) [8] и фильтр на основе эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD) [9], предложенный ранее автором для визуализации сеточных имплантов. Результаты алгоритмов сравнивались с помощью количественных метрик (описанных в соответствующем разделе), отражающих 2 основных принципа улучшения качества изображения: уменьшение шума и сохранность границ слоев ткани и неоднородностей.

Материалы и методы.

Описание эксперимента и исходных изображений.

Все данные получены от совершеннолетних пациентов (европеоиды, I и II фенотипы кожи). Протокол *ex vivo* исследования был одобрен этическим комитетом Самарского государственного медицинского университета.

Вначале врач осматривал пациента для постановки предварительного диагноза. В случае подозрения на меланому опухоль подвергали резекции. Размеры образца составляли примерно $2 \times 2 \times 1$ см. После этого образец делился на две части так, чтобы каждая часть занимала примерно половину площади видимой поверхности новообразования. Одну часть помещали в стерильный бокс при температуре $+4 \pm 2$ °C и в течение четырех часов доставляли в лабораторию для ОКТ-исследования. Вторую часть исследовали гистологически для подтверждения диагноза по стандартным протоколам окраски гемактоксином и эозином. В исследовании использовались 10 образцов с гистологически подтвержденными 3-й и 4-й стадиями меланомы.

Изображения были получены в ходе лабораторного *ex vivo* исследования доставленных образцов с помощью стандартной системы ОКТ спектрального типа с оптическим модулем – суперлюминесцентным лазерным диодом (полоса излучения 840 ± 45 нм, выходная мощность 20 мВт) [10]. Управление установкой осуществлялось в среде LabVIEW (National Instruments, США) при помощи программного

обеспечения (ПО) OKTLab [11]. С помощью указанного ПО изображения приводились к размеру 512×512 пикселей и сохранялись без какой-либо пост-обработки. К полученным 10 изображениям применялись различные алгоритмы шумоподавления, результаты которых представлены далее.

Алгоритмы шумоподавления.

Медианный фильтр [12] – нелинейный фильтр, часто использующийся в обработке изображения для подавления импульсного шума, называемого шумом "соль и перец". Значения отсчетов внутри скользящего окна фильтра сортируются в порядке возрастания (или убывания), и значение, находящееся в середине ранжированного ряда (его медиана), поступает на выход фильтра. Описанный фильтр лучше, чем свертка, одновременно уменьшает шум и сохраняет границы, подавляя также одиночные импульсные помехи (случайные шумовые выбросы отсчетов и промахи), но хуже обрабатывает гауссовский шум.

Локальный адаптивный *винеровский фильтр* [13] основан на обработке локальной окрестности каждого пикселя, что позволяет приблизить фильтрацию к оптимальной при искажении изображения постоянным аддитивным шумом. Этот фильтр, тем не менее, является попиксельным. Суть обработки состоит в том, что анализируемый пиксель замещается оценкой среднего значения по окрестности в тем большей степени, чем ближе локальная выборочная дисперсия к оценке дисперсии шума в пикселе. И напротив, чем более различаются указанные оценки, тем меньше фильтр воздействует на текущий пиксель.

Комплексный диффузионный фильтр [7] (Complex Diffusion Filter – CDF) основан на обобщении уравнения диффузии с комплексным коэффициентом диффузии:

$$\partial I / \partial t = \text{div} [C(I) \text{grad}(I)],$$

где I – изображение, рассматриваемое как матрица значений сигналов пикселей, изменяемых во времени; t – время; $\text{div}(\cdot)$ и $\text{grad}(\cdot)$ – операторы дивергенции и градиента соответственно; $C(\cdot)$ – комплексный нелинейный коэффициент диффузии.

Численное итерационное решение данного уравнения можно записать формулой [14]

$$I_{n+1} = I_n + \delta t \text{div} [C(I_n) \text{grad}(I_n)],$$

где δt – дискретный шаг по времени; n – номер итерации.

В качестве начального условия I_0 для данной динамической модели используется исходное (зашумленное) изображение.

В [14] показано, что для того, чтобы в процессе эволюции исходного изображения во времени при диффузии соседних пикселей друг в друга сохранялись границы, коэффициент диффузии должен быть определен следующим образом:

$$C(I_n) = \frac{e^{i\theta}}{1 + \left[\frac{\text{Im}(I_n)}{k\theta} \right]^2},$$

где θ – имеющая близкое к нулю значение фаза (угол) комплексного коэффициента диффузии; $\text{Im}(\cdot)$ – мнимая часть изображения на текущей итерации; k – пороговая константа, определяющая поток коэффициента диффузии.

В общем случае для динамического во времени многомерного процесса (комплексного изображения) $I(x, y, t)$ в декартовых координатах (x, y) справедливо соотношение

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\text{Im}[I(x, y, t)]}{\theta} = t\Delta(G_{\bar{\sigma}}) * I(x, y, 0);$$

$$\bar{\sigma} = \lim_{\theta \rightarrow 0} \sigma = \sqrt{2t},$$

где $\Delta(\cdot)$ – оператор Лапласа; $G_{\bar{\sigma}}$ – гауссовское ядро с нулевым средним и дисперсией $\bar{\sigma}^2$; * обозначает N -мерную свертку.

Таким образом, при $\theta \rightarrow 0$ мнимая часть изображения является произведением сглаженной второй производной исходного изображения, времени и фазы. Такая структура обеспечивает чувствительность CDF к перепадам яркости (границам).

Нечеткий анизотропный диффузионный интервальный фильтр второго типа [8] (Interval type II Fuzzy Anisotropic Diffusion filter – ITTFADF) для удаления шумов с изображения, аналогично CDF, основан на уравнении диффузии

$$\partial I / \partial t = \text{div}[D(x, y, t) \text{grad}(I)],$$

где анизотропный диффузионный вещественный (в отличие от CDF) коэффициент $D(x, y, t)$ принимает большие значения на однородных участках изображения и малые значения на участках с перепадами яркости (границы). Это позволяет контролировать диффузионные процессы [8]: ускорять

их на однородных регионах и, наоборот, ослаблять размытие каждого пикселя в области границ на изображении, в которых изначально локальное отношение сигнал/шум выше.

Для того чтобы алгоритм мог работать именно с шумами, требуется дополнительно внести в $D(x, y, t)$ зависимость от уровня шума. Поэтому итоговый коэффициент диффузии зависит от степени неоднородности в текущей области анализа $E(x, y, t)$ и ее зашумленности $Z(x, y, t)$. Причем оба параметра оцениваются с помощью нечеткой логики. Вклад степени неоднородности в коэффициент диффузии с ростом неоднородности окрестности снижается; для зашумленности зависимость обратная. Указанные зависимости описываются выражениями [15]:

$$E(x, y, t) = G_{\sigma} * \text{med} \left(\sqrt{|\nabla_x * (G_{\sigma} * I)|^2 + |\nabla_y * (G_{\sigma} * I)|^2} \right);$$

$$Z(x, y, t) = |I(x, y, t) - \frac{1}{(2K+1)^2 - 1} \sum_{i=-K}^{i=K} \sum_{j=-K}^{j=K} I(x+i, y+j, t)|;$$

$$D(x, y, t) = 0.5[\text{Fuzzy}(E) + \text{Fuzzy}(Z)],$$

где $\text{med}(\cdot)$ – медианный фильтр; K – размер окрестности;

$$\nabla_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \nabla_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

– операторы Превицта оценки градиента по направлениям x и y соответственно; $\text{Fuzzy}(\cdot)$ – оператор нечеткой логики.

Итерационная последовательность приближенной оценки диффузии строится аналогично диффузионному фильтру.

Алгоритм шумоподавления на основе эмпирической модовой декомпозиции разработан для визуализации сеточных имплантов [9].

Алгоритм состоит из двух этапов. На первом происходит фильтрация кадра скользящим средним в окрестности с размерами 3×3 . На втором этапе выбранное изображение раскладывается построчно на собственные модовые функции (Intrinsic Mode Function – IMF) с помощью метода эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD) с последующей пороговой обработкой IMF.

Идея EMD состоит в последовательном отсеивании из сигнала высоких частот. В результате исходный сигнал $s(x)$ разбивается на сумму N квазиортогональных квазипериодических IMF $c_i(x)$ и остаток $r(x)$:

$$s(x) = \sum_{i=1}^N c_i(x) + r(x).$$

Практически реализуемые IMF удовлетворяют двум условиям:

- на всем множестве данных число экстремумов и число переходов через ноль различаются не более, чем на единицу;
- в каждой точке среднее значение огибающих, определяемое локальными максимумами и минимумами, близко к нулю.

Процесс отсеивания мод в EMD можно кратко представить следующим образом. Взяв за начальное (нулевое) приближение к $c_1(x)$ сигнал $s(x)$, первое приближение можно получить, если вычесть из нулевого приближения его сглаженную версию, которая оценивается как среднее между верхней и нижней огибающими, полученными интерполяцией максимумов и минимумов сигнала соответственно. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока изменениями между итерациями нельзя будет пренебречь. Аналогично выполняется отсеивание моды $c_2(x)$ из остаточного сигнала $r(x) - c_1(x)$. Отсеивание мод происходит до тех пор, пока нужное количество IMF не будет отсеяно. Оставшийся сигнал принимается за остаток $r(x)$.

После разложения над первыми несколькими (обычно от одной до трех) IMF выполняется пороговая обработка (учитывая простое предположение, что амплитуда сигнала больше амплитуды шума). При этом пиксели тех полупериодов, амплитуда которых меньше некоторого наперед заданного порога T , обнуляются. Такой подход отличается от классических понятий жесткой и мягкой пороговой обработки, где обнуляются значения в пикселях, меньшие заданного порога. В рассматриваемом случае пороговой обработки алгоритм оперирует полупериодами как минимальными единицами сигнала, что возможно благодаря тому, что IMF являются квазипериодическими.

Метрики оценки качества шумоподавления. Для оценки качества шумоподавления использованы 4 количественные оценки. Оценки выбирались таким образом, чтобы максимально оценить

как общее снижение уровня шума, так и сохранность границ – 2 признака, играющих основную роль при диагностике по снимкам ОКТ.

Отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR) характеризует превышение сигнала над шумом. SNR определяется отношением дисперсий сигнала σ_s^2 и шума σ_n^2 :

$$\text{SNR} = \sigma_s^2 / \sigma_n^2.$$

Эффективное число наблюдений (Effective Number of Looks – ENL) [15] – оценка спекла на изображении. Под спеклом понимается интерференционная картина, формируемая в результате интерференции оптических потоков случайно расположенных рассеивателей в формирующей изображение оптической системе. ENL дает существенное представление о гладкости на снимках в областях, которые должны быть однородными, но были искажены шумом. ENL оценивается как отношение квадрата выборочного среднего значений сигнала в пикселях изображения или его анализируемого фрагмента μ к дисперсии этих значений σ^2 : $\text{ENL} = \mu^2 / \sigma^2$.

Индекс структурного сходства (Structural Similarity – SSIM) двух изображений [17] является мерой схожести между двумя изображениями I_1 и I_2 :

$$\text{SSIM}(I_1, I_2) = \frac{(2\mu_{I_1}\mu_{I_2} + C_1)(2\sigma_{I_1I_2} + C_2)}{(\mu_{I_1}^2 + \mu_{I_2}^2 + C_1)(\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2 + C_2)},$$

где C_1 и C_2 – стабилизирующие константы; μ_{I_1} , μ_{I_2} – выборочные средние изображений или их сравниваемых областей; $\sigma_{I_1}^2$, $\sigma_{I_2}^2$ – выборочные дисперсии;

$$\sigma_{I_1I_2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_{I_1})(y_i - \mu_{I_2})$$

– ковариация I_1 и I_2 .

Параметр корреляции χ [7]:

$$\chi(I_1, I_2) = Nm(I_1, I_2) / Dn(I_1, I_2),$$

где

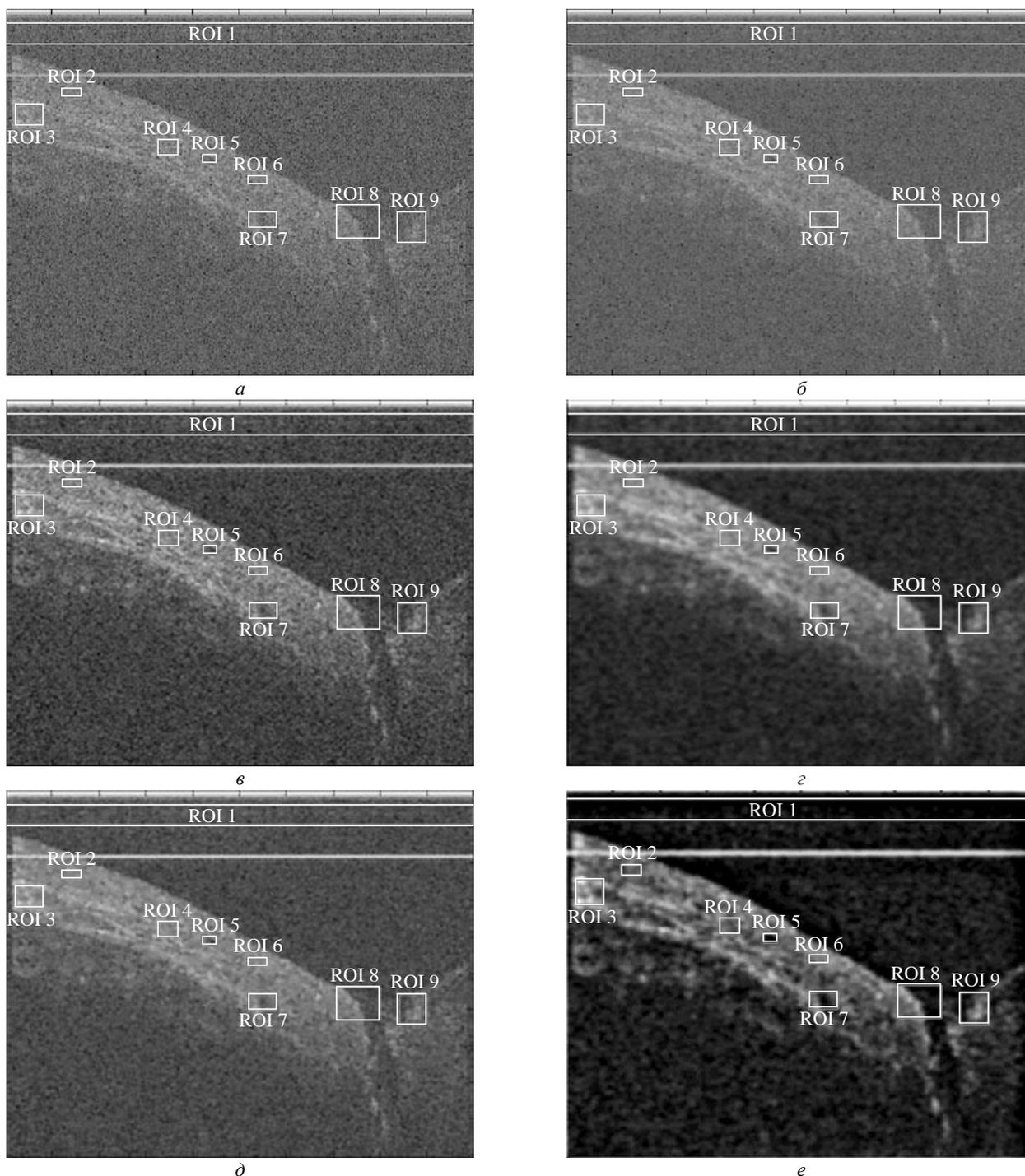
$$Nm(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^N \left(\left\{ [\Delta(I_1)]_i - \mu_{\Delta(I_1)} \right\} \left\{ [\Delta(I_2)]_i - \mu_{\Delta(I_2)} \right\} \right);$$

$$Dm(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^N \left(\left\{ [\Delta(I_1)]_i - \mu_{\Delta(I_1)} \right\}^2 \left\{ [\Delta(I_2)]_i - \mu_{\Delta(I_2)} \right\}^2 \right);$$

Δ – оператор Лапласа; $\mu_{\Delta(I_1)}$, $\mu_{\Delta(I_2)}$ – выборочные средние лапласианов изображений.

Параметр используется для оценки сохранения резкости границы. Для достижения оптимального эффекта сохранения края параметр должен быть близок к единице.

Результаты. На рисунке представлен пример исходного изображения, а также результат обработки всеми фильтрами. Отмечены 9 областей



Исходное ОКТ-изображение меланомы (а); результаты его обработки: медианным фильтром (б), винеровским фильтром (в), КДФ (з), НАДФВТ (д), EMD-фильтром (е). Размеры изображений 512×512 пикселей
 Original OCT image of malignant melanoma (a); results of it's processing by filters: median (б), wiener (в), CDF (з), ITTFADF (д), EMD-filter (е). Images size 512×512 pixels

(RegionofImages – ROI), которые используются для оценок SNR (табл. 1) и ENL (табл. 2). Область ROI 1 расположена вне изображения анализируемого объекта (соответствует воздушной прослойке между сканнатором и образцом), поэтому условно считается шумовой и используется для оценки дисперсии шума при определении SNR. ROI 2...ROI 7 находятся в разных частях изображения ткани анализируемого объекта, ROI 8 и ROI 9 – на границе ткани с воздухом.

Табл. 1 показывает, что EMD-фильтр достигает наилучших результатов по SNR в однородных областях (ROI 2...4). В неоднородных областях (ROI 5...9) результаты EMD-фильтра сравнимы с результатами CDF. Это обусловлено тем, что в EMD-фильтре используется пороговая обработка шумов. Таким образом, в однородных областях шумовые всплески просто отсекаются порогом. ITTFADF достигает большего значения SNR в однородных областях, чем фильтр Винера и медианный фильтр, однако проигрывает CDF во всех ROI, что достаточно неожиданно. Это позволяет сделать вывод, что, возможно, комплексная форма диффузионного уравнения лучше аппроксимирует процесс, чем оценка диффузионного анизотропного коэффициента посредством нечеткой логики.

В табл. 2 представлены оценки значений ENL для нешумовых ROI. Несмотря на то, что параметр ENL предназначен для оценки однородных областей с медленноменяющимся сигналом, получен-

ные результаты свидетельствуют о значительном росте ENL также для неоднородных областей, включая границу ткани с воздухом. Это можно объяснить априори высоким уровнем шума, что приводит к увеличению дисперсии суммарного сигнала и к уменьшению ENL. Наибольший рост ENL отмечается у КДФ.

По критериям индекса структурного сходства (SSIM) и индекса резкости границ (коэффициент корреляции) χ (табл. 3 и 4) наилучший результат имеют EMD-фильтр и фильтр Винера. При этом для всех остальных фильтров значения не достигают 0.5 (при максимуме модуля χ , равном единице). Отдельно необходимо отметить, что результат для ITTFADF существенно лучше, чем для CDF.

ОКТ-изображения представляют собой визуализацию границ переходов между слоями среды (в данном случае – кожи) с различными показателями преломления. В этом смысле особенно важен результат по коэффициенту корреляции, поскольку лучшая сохранность границ особенно важна для визуальной экспертной оценки врачом. Таким образом, подобные интегральные оценки, возможно, даже важнее в случае ОКТ, чем, например, классический SNR, поскольку априорный уровень шума неизвестен.

Обсуждение и выводы. В настоящей статье проведено сравнительное исследование пяти алгоритмов фильтрации применительно к ОКТ-изображениям меланомы кожи: фильтра Винера, меди-

Табл. 1. Средняя оценка SNR для ROI 2... ROI 9 для различных фильтров. Полужирным шрифтом выделены максимальные значения для каждой ROI

Table 1. The average SNR value for ROI 2... ROI 9 for various filters. Maximum values for each ROI are in bold

Фильтр/Filter	ROI							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Средняя оценка SNR							
Без обработки	1.83	1.80	2.05	2.16	0.55	0.58	1.06	0.53
Винеровский	3.65	2.98	3.62	3.08	0.80	0.81	1.54	0.67
Медианный	4.00	3.86	3.69	3.27	1.01	0.97	1.91	0.82
КДФ	9.88	8.76	10.26	5.33	1.18	1.72	2.49	0.82
НАДИФВТ	7.24	4.97	5.86	3.87	0.95	0.94	1.90	0.73
EMD-фильтр	10.02	9.23	10.52	5.37	1.03	1.56	2.55	0.84

Табл. 2. Средняя оценка ENL для ROI 2... ROI 9 для различных фильтров. Полужирным шрифтом выделены максимальные значения для каждой ROI

Table 2. The average ENL value for ROI 2... ROI 9 for various filters. Maximum values for each ROI are in bold

Фильтр	ROI							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Средняя оценка ENL							
Без обработки	3.35	3.24	4.21	4.66	0.31	0.33	1.12	0.28
Винеровский	13.31	8.90	13.08	9.49	0.64	0.65	2.38	0.45
Медианный	16.03	14.94	13.61	10.71	1.02	0.94	3.65	0.68
КДФ	97.53	76.71	105.27	28.44	1.38	2.97	6.19	0.67
НАДИФВТ	52.39	24.66	34.33	14.95	0.90	0.89	3.62	0.54
EMD-фильтр	62.35	45.87	62.56	20.06	1.20	1.58	4.93	0.52

Табл. 3. Среднее значение SSIM между оригинальным и обработанным изображениями для различных фильтров

Table 3. The average SSIM value between the original and processed images for various filters

Фильтр/Filter	Среднее значение SSIM/ Average SSIM Value
Винеровский/ Wiener	0.55
Медианный/ Median	0.26
КДФ/CDF	0.11
НАДИФВТ/ ITTFADF	0.34
EMD-фильтр/ EMD- filter	0.62

Табл. 4. Средняя оценка степени сохранности границ χ по отношению к оригинальному изображению для различных фильтров

Table 4. Average estimate of the degree of preservation of boundaries χ in relation to the original image for various filters

Фильтр/Filter	Среднее значение χ / Average χ Value
Винеровский/ Wiener	0.60
Медианный/ Median	0.17
КДФ/CDF	0.27
НАДИФВТ/ ITTFADF	0.46
EMD-фильтр/ EMD- filter	0.72

анного, CDF, ITTFADF и EMD-фильтров. Для количественной оценки качества шумоподавления использовались 4 оценки: SNR, ENL, SSIM и χ . SNR и ENL носят, скорее, обобщенный характер, оценивая возможность каждого алгоритма подавить паразитную высокочастотную составляющую спектра шума. SSIM и χ , в свою очередь, оценивают, насколько хорошо сохраняется полезная высокочастотная составляющая сигнала, которая очень важна при интерпретации ОКТ-снимков: границы визуализируют те области, где происходит изменение показателя преломления, визуализируя тем самым неоднородности.

Проведенное исследование не выявило лучший алгоритм по всем четырем метрикам. Например, по метрике SNR лучше всего работают EMD-фильтр и CDF в зависимости от типа области, при этом CDF лишь на четвертом месте по SSIM и χ , что свидетельствует о том, что этот фильтр сильно размывает границы. EMD-фильтр при этом либо лучший по всем признакам, либо уступает на неоднородных областях по SNR и занимает второе место по ENL. Приняв за верную предложенную ранее гипотезу о большей важности сохранности границ по сравнению с интегральной оценкой шума, можно сделать однозначный вывод о необходимости использования именно EMD-фильтра. Однако сама гипотеза (насколько известно автору) не была доказана или опровергнута в клинических испыта-

ниях. В известных исследованиях [7, 16–18] использованы алгоритмы с разными метриками и на разных наборах и разных тканях, что не дает возможности однозначно провести сравнение.

Одним из существенных недостатков EMD-фильтра является его одномерная природа и высокие требования к вычислительным ресурсам. В качестве альтернативы EMD, согласно проведенному исследованию, можно порекомендовать использовать винеровский фильтр (выигрывающий на индексах сохранности границ) или ITTFADF, который занял третье место по всем используемым метрикам.

Одним из перспективных применений ОКТ при анализе кожных новообразований является определение глубины инвазии. Например, для меланомы глубина инвазии фактически определяет стадию, от которой зависит оценка возможных последствий и правильное планирование хирургического вмешательства. В настоящее время стадия определяется постфактум по гистологическому исследованию. Однако оптическая плотность меланомы не позволяет (на примененной лабораторной установке) получить сигнал с глубоких слоев (более 1.5...2 мм), а следовательно, и определять глубину инвазии уже для второй стадии меланомы. Улучшение SNR потенциально может увеличить глубину сканирования. Перенеся акцент с новообразований кожи на хороидальные новообразования, следует отметить, что только увеличение глубины сканирования помогло детектировать хороидальные новообразования, включая меланому [19].

Рассмотренные методы основаны на априори сконструированных оценках. Необходимо отметить, что в последнее время все большую популярность приобретают механизмы искусственного интеллекта, которые позволяют настраивать фильтры под конкретный тип изображений, получая максимальный результат, используя фантомы для обучения модели вместо предопределенных процедур фильтрации. В [20] для этого использован метод вейвлет-преобразования, предоставляющий набор сверток изучаемого изображения с набором базисных функций, оптимизированных под решаемую задачу. Такой подход идеально ложится в идеологию глубинного обучения [21], позволив при этом подобрать оптимальные для определенного класса коэффициенты вейвлет-преобразования. Вместо реальных фантомов ткани можно использовать и их цифровые изображения. В [22, 23] использован метод Монте-Карло для оценки рассеянного излучения и формирования изображения ОКТ. Однако оба эти подхода пока не вошли в широкую практику в академическом сообществе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drexler W., Fujimoto J.G. State-of-the-art Retinal Optical Coherence Tomography // *Progress in Retinal and Eye Research*. 2008. Vol. 27, № 1. P. 45–88. doi: 10.1016/j.preteyeres.2007.07.005
2. Wang J., Xu Y., Boppart S. A. Review of Optical Coherence Tomography in Oncology // *J. of biomedical optics*. 2017. Vol. 22, № 12. Art. 121711. doi: 10.1117/1.JBO.22.12.121711
3. Optical Coherence Tomography for the Diagnosis of Malignant Skin Tumors: a Meta-analysis / Y.-Q. Xiong, Y. Mo, Y.-Q. Wen, M.-J. Cheng, S.-T. Huo, X.-J. Chen, Q. Chen // *J. of biomedical optics*. 2018. Vol. 23, № 2. Art. 020902. doi: 10.1117/1.JBO.23.2.020902
4. A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise / V. Frost, J. Stiles, K. Shanmugan, J. Holtzman // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1982. Vol. PAMI-4, iss. 2. P. 157–166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223
5. Verhoeven J. T. M., Thijssen J. M. Improvement of Lesion Detectability by Speckle Reduction Filtering: A Quantitative Study // *Ultrasonic Imaging*. 1993. Vol. 15, № 3. P. 181–204. doi: 10.1006/uimg.1993.1012
6. Rogowska J., Brezinski M. E. Evaluation of the Adaptive Speckle Suppression Filter for Coronary Optical Coherence Tomography Imaging // *IEEE Trans. on Medical Imaging*. 2000. Vol. MI-19, iss. 12. P. 1261–1266. doi: 10.1109/42.897820
7. Salinas H. M., Fernández D. C. Comparison of PDE-based Nonlinear Diffusion Approaches for Image Enhancement and Denoising in optical coherence Tomography // *IEEE Trans. on Medical Imaging*. 2007. Vol. MI-26, № 6. P. 761–771. doi: 10.1109/TMI.2006.887375
8. Puvanathan S., Bizheva K. Interval Type-II Fuzzy Anisotropic Diffusion Algorithm for Speckle Noise Reduction in Optical Coherence Tomography Images // *Optics express*. 2009. Vol. 17, iss. 2. P. 733–746. doi: 10.1364/OE.17.000733
9. Noise Reduction Method for OKT Images based on Empirical Mode Decomposition / O. O. Myakinin, D. V. Kornilina, I. A. Bratchenko, V. P. Zakharov, A. G. Khramov // *J. of Innovative Optical Health Sciences*. 2013. Vol. 6, № 2. Art. 1350009. doi: 10.1142/S1793545813500090
10. Мякинин О. О. Системы анализа биомедицинских данных для диагностики злокачественных новообразований кожи // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2020. Vol. 23, № 3. P. 80–92. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-80-92
11. Baranov S. A. OKTlab. C++ and Lab View solution for Optical Coherence Tomography. URL: <https://code.google.com/archive/p/OKTlab/> (дата обращения 18.06.2020)
12. Medfilt 2. 2-D median filtering. Math Works. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html> (дата обращения 18.06.2020)
13. Wiener 2. 2-D Adaptive Noise-Removal Filtering. Math Works. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/wiener2.html> (дата обращения 18.06.2020)
14. Rodrigues P., Serranho P., Bernardes R. 3D Non-linear Complex-Diffusion Filter on GPU // 2012 Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 28 Aug.–1 Sept. 2012, San Diego, USA. P. 110–113. doi: 10.1109/EMBC.2012.6345883
15. Tizhoosh H. R. Image Thresholding using Type II Fuzzy Sets // *Pattern recognition*. 2005. Vol. 38, № 12. P. 2363–2372. doi: 10.1016/j.patcog.2005.02.014
16. Speckle Reduction in Optical Coherence Tomography Images using Digital Filtering / A. Ozcan, A. Bilenca, A. E. Desjardins, B. E. Bouma, G. J. Tearney // *J. of the Optical Society of America A*. 2007. Vol. 24, iss. 7. P. 1901–1910. doi: 10.1364/josaa.24.001901
17. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // *IEEE Trans. on Image Processing*. 2004. Vol. 13, iss. 4. P. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
18. Research and Comparison of OKT Image Speckle Denoising Algorithm / D. Song, Y. Liu, X. Lin, J. Liu, J. Tan // 2019 IEEE 8th Joint Intern. Information Technology and Artificial Intelligence Conf. (ITAIC), Chongqing, China, 24–26 May 2019. P. 1554–1558. doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785813
19. Evaluation of Choroidal Tumors with Optical Coherence Tomography: Enhanced Depth Imaging and OKT-angiography Features / G. Cennamo, M. Romano, M. Breve, N. Velotti, M. Reibaldi, G. de Crecchio, G. Cennamo // *Eye*. 2017. Vol. 31. P. 906–915. doi: 10.1038/eye.2017.14
20. Nanoparticle-enabled Experimentally Trained Wavelet-domain Denoising Method for Optical Coherence Tomography / I. N. Dolganova, N. V. Chernomyrdin, P. V. Aleksandrova, S.-I. T. Beshplav, A. A. Potapov, I. V. Reshetov, V. N. Kurlov, V. V. Tuchin, K. I. Zaytsev // *J. of biomedical optics*. 2018. Vol. 23, № 9. Art. 091406. doi: 10.1117/1.JBO.23.9.091406
21. Comparative study of deep learning models for optical coherence tomography angiography / Z. Jiang, Z. Huang, B. Qiu, X. Meng, Y. You, X. Liu, G. Liu, C. Zhou, K. Yang, A. Maier, Q. Ren, Y. Lu // *Biomed Opt Express*. 2020. Vol. 11, № 3. P. 1580–1597. doi: 10.1364/BOE.387807
22. Simulation of Optical Coherence Tomography Images by Monte Carlo Modeling based on Polarization Vector Approach / M. Kirillin, I. Meglinski, E. Sergeeva, V. L. Kuzmin, R. Myllyla // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, iss. 21. P. 21714–21724. doi: 10.1364/OE.18.021714
23. Monte Carlo Simulation of Optical Coherence Tomography Signal of the Skin Nevus / I. N. Dolganova, A. S. Neganova, K. G. Kudrin, K. I. Zaytsev, I. V. Reshetov // *J. of Physics: Conf. Ser.* 2016. Vol. 673. Art. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/673/1/012014

Информация об авторе

Мякинин Олег Олегович – магистр по направлению "Прикладные математика и информатика" (2011), старший преподаватель кафедры лазерных и биотехнических систем Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева, научный сотрудник лаборатории "Фотоника" указанного университета. Автор более 50 научных работ. Область научных интересов: компьютерное зрение, искусственный интеллект, обработка биомедицинских сигналов.

Адрес: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Московское шоссе, д. 34, Самара, 443086, Россия

E-mail: myakole@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0859-1282>

References

1. Drexler W., Fujimoto J. G. State-of-the-art Retinal Optical Coherence Tomography. *Progress in Retinal and Eye Research*. 2008, vol. 27, no. 1, pp. 45-88. doi: 10.1016/j.preteyeres.2007.07.005
2. Wang J., Xu Y., Boppart S. A. Review of Optical Coherence Tomography in Oncology. *J. of biomedical optics*. 2017, vol. 22, no. 12, pp. 121711. doi: 10.1117/1.JBO.22.12.121711
3. Xiong Y.-Q., Mo Y., Wen Y.-Q., Cheng M.-J., Huo S.-T., Chen X.-J., Chen Q. Optical coherence tomography for the diagnosis of malignant skin tumors: a meta-analysis. *Journal of biomedical optics*. 2018, vol. 23, no. 2, pp. 020902. doi: 10.1117/1.JBO.23.2.020902
4. Frost V., Stiles J., Shanmugan K., Holtzman J. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1982, vol. 2, pp. 157-166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223
5. Verhoeven J. T. M., Thijssen J. M. Improvement of lesion detectability by speckle reduction filtering: A quantitative study. *Ultrasonic Imaging*. 1993, vol. 15, no. 3, pp. 181-204. doi: 10.1006/uimg.1993.1012
6. Rogowska J., Brezinski M. E. Evaluation of the adaptive speckle suppression filter for coronary optical coherence tomography imaging. *IEEE transactions on medical imaging*. 2000, vol. 19, no. 12, pp. 1261-1266. doi: 10.1109/42.897820
7. Salinas H. M., Fernández D. C. Comparison of PDE-based nonlinear diffusion approaches for image enhancement and denoising in optical coherence tomography. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2007, vol. 26, no. 6, pp. 761-771. doi: 10.1109/TMI.2006.887375
8. Puvanathan P., Bizheva K. Interval type-II fuzzy anisotropic diffusion algorithm for speckle noise reduction in optical coherence tomography images. *Optics express*. 2009, vol. 17, no. 2, pp. 733-746. doi: 10.1364/OE.17.000733
9. Myakinin O. O., Kornilin D. V., Bratchenko I. A., Zakharov V. P., Khramov A. G. Noise reduction method for OKT images based on Empirical Mode Decomposition. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2013, vol. 6, no. 02, pp. 1350009. doi: 10.1142/S1793545813500090
10. Myakinin O. O. Biomedical data analysis systems for the diagnosis of skin malignancies. *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of Russian universities. Radio electronics]. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 80–92. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-80-92 (In Russ.)
11. Baranov S. A. OKTlab. C++ and LabView solution for Optical Coherence Tomography. Available at: <https://code.google.com/archive/p/OKTlab/> (accessed 18.06.2020)
12. Medfilt 2. 2-D median filtering. Math Works. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html> (accessed 18.06.2020)
13. Wiener 2. 2-D Adaptive Noise-Removal Filtering. Math Works. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/wiener2.html> (accessed 18.06.2020)
14. Rodrigues P., Serranho P., Bernardes R. 3D non-linear complex-diffusion filter on GPU. 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2012, pp. 110-113. doi: 10.1109/EMBC.2012.6345883
15. Tizhoosh H. R. Image thresholding using type II fuzzy sets. *Pattern recognition*. 2005, vol. 38, no. 12, pp. 2363-2372. doi: 10.1016/j.patcog.2005.02.014
16. Ozcan A., Bilena A., Desjardins A. E., Bouma B. E., Tearney G. J. Speckle reduction in optical coherence tomography images using digital filtering. *Journal of the Optical Society of America A*. 2007, vol. 24, no. 7, pp. 1901-1910. doi:10.1364/josaa.24.001901
17. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*. 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600-612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
18. Song D., Liu Y., Lin X., Liu J., Tan J. Research and Comparison of OKT Image Speckle Denoising Algorithm. 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2019, pp. 1554-1558. doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785813
19. Cennamo G., Romano M., Breve M., Velotti N., Reibaldi M., de Crechio G., Cennamo G. Evaluation of choroidal tumors with optical coherence tomography: enhanced depth imaging and OKT-angiography features. *Eye*. 2017, vol. 31, pp. 906–915. doi: 10.1038/eye.2017.14
20. Dolganova I. N., Chernomyrdin N. V., Aleksandrova P. V., Beshplav S.-I. T., Potapov A. A., Reshetov I. V., Kurlov V. N., Tuchin V. V., Zaytsev K. I. Nanoparticle-enabled experimentally trained wavelet-domain denoising

method for optical coherence tomography. Journal of biomedical optics. 2018, vol. 23, no. 9, art. 091406. doi: 10.1117/1.JBO.23.9.091406

21. Z. Jiang, Z. Huang, B. Qiu, X. Meng, Y. You, X. Liu, G. Liu, C. Zhou, K. Yang, A. Maier, Q. Ren, Y. Lu Comparative study of deep learning models for optical coherence tomography angiography. Biomed Opt Express. 2020, vol. 11, no. 3, pp. 1580–1597. doi: 10.1364/BOE.387807

22. Kirillin M., Meglinski I., Sergeeva E., Kuzmin V.L., Myllyla R. Simulation of optical coherence tomography

images by Monte Carlo modeling based on polarization vector approach. Optics Express. 2010, vol. 18, no. 21, pp. 21714–21724. doi: 10.1364/OE.18.021714

23. Dolganova I. N., Neganova A. S., Kudrin K. G., Zaytsev K. I., Reshetov I. V. Monte Carlo simulation of optical coherence tomography signal of the skin nevus. Journal of Physics: Conference Series. 2016, vol. 673, pp. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/673/1/012014

Information about the author

Oleg O. Myakinin, Master's degree on Applied Mathematics and Computer Science (2011), Senior Lecturer of the Department Lasers and Biotechnical Systems of the Samara State Aerospace University, a Researcher of the "Photonics" Laboratory of named University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: computer vision, artificial intelligence, biomedical signal processing.

Address: Samara National Research University, 34 Moskovskoe Ave., Samara 443086, Russia

E-mail: myakole@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0859-1282>

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

УДК 616-072:612.135

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-77-91>

Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики

А. В. Дунаев 

Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Орел, Россия

 dunaev@bmccenter.ru

Аннотация

Введение. Нарушения деятельности микроциркуляторно-тканевых систем организма человека играют ключевую роль в патогенезе осложнений различных заболеваний. Однако при неинвазивном мониторинге микроциркуляторной функции и метаболических нарушений существует ряд нерешенных методологических и инструментальных проблем, связанных с недостаточной точностью, воспроизводимостью и информативностью результатов диагностики. Предложенный в настоящей статье подход мультипараметрической оптической диагностики, при котором оптические неинвазивные технологии применяются в сочетанном виде, может стать перспективным инструментом, улучшающим чувствительность и точность выявления микроциркуляторных и метаболических нарушений на ранней стадии, что важно для диагностики и лечения заболеваний различного профиля.

Цель работы. Разработка метода и устройства для оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики и оценка их диагностического потенциала в клинической практике.

Материалы и методы. В работе использованы теории переноса излучения, прикладной математической статистики и методов клинических исследований. Приведены статистические показатели разработанных методов диагностики, описан принцип построения устройства.

Результаты. Разработан оригинальный метод и принцип построения устройства для оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики.

Заключение. В настоящей статье представлен метод и устройство для оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе указанного подхода. Описаны основные принципы каждого из диагностических каналов – лазерной доплеровской флоуметрии, флуоресцентной спектроскопии и спектроскопии диффузного отражения. Представлены примеры клинического применения описанного устройства в различных областях медицины (эндокринология, ревматология, мини-инвазивная хирургия). Предложенный метод и принцип построения устройства с возможностью его технической адаптации за счет разработки дополнительных зондов для конкретных задач биомедицинских исследований делает проведение оптической неинвазивной диагностики доступным и повышает ее информативность.

Ключевые слова: микроциркуляция крови, окислительный метаболизм, микроциркуляторно-тканевые системы, лазерная доплеровская флоуметрия, флуоресцентная спектроскопия, спектроскопия диффузного отражения, мультипараметрическая диагностика

Для цитирования: Дунаев А. В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 77–91. Doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-77-91

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания № 310, проект ГЗ-14/9) и РНФ (№ 18-15-00201).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность за ценные замечания при подготовке рукописи профессору, д-ру мед. наук А. И. Крупаткину и канд. техн. наук В. В. Сидорову

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.06.2020; принята к публикации после рецензирования 15.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020

© Дунаев А. В., 2020



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

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

A Method and a Device for Evaluating the Functional State of Microcirculatory-Tissue Systems of the Human Body Based on Multiparametric Optical Diagnostics

Andrey V. Dunaev✉

Orel State University n. a. I. S. Turgenev, Orel, Russia

✉ dunaev@bmecenter.ru

Abstract.

Introduction. Violations of the microcirculatory-tissue systems of the human body play a key role in the pathogenesis of various diseases complications. However, there are a few unresolved methodological and instrumental problems with non-invasive monitoring of microcirculatory function and metabolic disorders associated with insufficient accuracy, reproducibility and informativeness of diagnostic results. The proposed approach of multiparametric optical diagnostics, when optical non-invasive technologies are used in combination, can be a promising tool that improves the sensitivity and accuracy of detecting microcirculatory and metabolic disorders at an early stage, which is important for the diagnosis and treatment of diseases of various profiles.

Aim. Development of a method and device for assessing the functional state of microcirculatory-tissue systems of the human body based on multiparametric optical diagnostics and assessment of its diagnostic potential in clinical practice.

Materials and methods. In the paper, theories of radiation transfer, applied mathematical statistics and clinical research methods are used. The statistical indicators of the developed diagnostic methods are given, the principle of the device construction is described.

Results. An original method and principle for constructing a device for assessing the functional state of microcirculatory-tissue systems of the human body based on multiparametric optical diagnostics has been developed.

Conclusion. The present work presents a method and device for assessing the functional state of microcirculatory-tissue systems of the human body based on this approach. The basic principles of each of the diagnostic channels (laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy and diffuse reflectance spectroscopy) are described. Examples of the clinical application of the described device in various fields of medicine (endocrinology, rheumatology, minimally invasive surgery) are presented. The method proposed in this article and principle for constructing a device with the possibility of its technical adaptation by developing additional probes for specific tasks of biomedical research makes optical non-invasive diagnostics affordable and increases its information content.

Keywords: blood microcirculation, oxidative metabolism, microcirculatory-tissue systems, laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy, diffuse reflectance spectroscopy, multiparametric diagnostics

For citation: Dunaev A. V. A Method and a Device for Evaluating the Functional State of Microcirculatory-Tissue Systems of the Human Body Based on Multiparametric Optical Diagnostics. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 77–91. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-77-91

Source of financing. This work was supported by the state task of the Ministry of Education and Science, Russian Federation (basic part, no. 310) and by Russian Science Foundation under project No.18-15-00201

Acknowledgments. The author expresses deep gratitude for the valuable comments during the preparation of the manuscript to Professor, MD. A. I. Krupatkin and Ph.D. V. V. Sidorov

Conflict of interest. Author declares no conflict of interest.

Submitted 01.06.2020; accepted 15.07.2020; published online 29.09.2020

Введение. Микроциркуляторно-тканевые системы (МТС) организма человека представляют собой наименьшую функциональную единицу сосудистой системы, в которой микрососуды находятся в тесной взаимосвязи с окружающими их тканевыми и регуляторными элементами [1].

Основная функция периферической гемодинамики заключается в доставке питательных веществ и удалении продуктов метаболизма, а также в обеспечении оптимального газообмена для поддержания гомеостаза органов и тканей и их адаптации к конкретным условиям жизнедеятельности.

Нарушения, связанные с функционированием МТС, являются определяющими в оценке тяжести течения и прогнозирования исходов при различных патологических состояниях. Одна из основных проблем современной медицины – сахарный диабет (СД) – проявляется на уровне полиорганной патологии в результате микрососудистых нарушений, влекущих за собой метаболические расстройства [2]. В основе патогенеза СД лежит агрессивное действие гипергликемии, приводящее к развитию диабетической ангиопатии, которая распространяется на мелкие сосуды с развитием микроангиопатий. Диабетическая микроангиопатия поражает все жизненно важные органы и является одной из основных причин развития ретинопатии, нефропатии, кардиопатии, полинейропатии и др. [3].

К другим широко распространенным состояниям, связанным с микрососудистой дисфункцией, относятся ревматические заболевания (РЗ): болезнь Рейно, системный склероз, системная красная волчанка, ревматоидный артрит и др. Ведущую роль в развитии микроциркуляторных расстройств в ревматологической патологии играют иммуновоспалительные реакции [4]. РЗ приводят к морфологическим нарушениям микроциркуляторного русла: разрежению капиллярной сети, асимметрии капилляров и появлению мегакапилляров. Степень микроциркуляторных расстройств определяет тяжесть патологических процессов в суставах, характер заболевания и его прогноз.

Еще одним социально значимым заболеванием, при котором происходит вовлечение МТС в патологические процессы, является псориаз. Кожная микроциркуляция у больных псориазом значительно отличается от таковой у здоровых людей. В стадии манифестации заболевания регистрируются высокие уровни ангиогенных факторов роста, отмечается утолщение, удлинение, извитость капилляров, увеличение кровотока на пораженных участках [5]. Часто сосудистые изменения предшествуют появлению кожных поражений, а клиническое разрешение псориазических бляшек связано с возвращением этих микроциркуляторных изменений в норму.

Немаловажным является диагностика состояния МТС в гастроэнтерологии. Микроциркуляторная дисфункция играет важную роль в патогенезе заболеваний желудочно-кишечного тракта. Нарушение микроциркуляции крови стенок кишечника и желудка может привести к снижению

барьерной функции и развитию язвенной болезни, колитов, энтеритов и др. [6]. Диагностика локальных нарушений перфузии и кислородонасыщения тканей органов брюшной полости дает дополнительную информацию при оценке жизнеспособности тканей во время проведения оперативных вмешательств [7].

Учитывая широкий спектр заболеваний, для которых микрососудистая дисфункция и вызванные ею метаболические нарушения могут играть важную роль в патогенезе самого заболевания и его осложнений, методы и устройства для оценки состояния МТС могут явиться эффективным клиническим инструментом, значительно улучшающим диагностическую и прогностическую оценку развития патологий. В настоящий момент мониторинг состояния МТС и оценка метаболических нарушений весьма затруднены вследствие требований, предъявляемых к методам их диагностики: низкой стоимости и возможности реализации массового исследования, оперативности исследования, легкости его автоматизации, неинвазивности, комфорта для пациента, простоты приборной реализации и интерпретации данных при сохранении достаточной достоверности результатов диагностики. Одними из новых, перспективных и многообещающих направлений развития современных методов оценки состояния МТС организма являются методы оптической неинвазивной диагностики (ОНД), часто объединяемые термином "оптическая биопсия" [8]. Важно также, что оптические методы исследования предоставляют информацию в количественной форме, что может придать дополнительную объективность процессу диагностики заболеваний.

В основу оптических технологий получения информации о биохимическом состоянии и морфологическом строении исследуемого участка положена оценка результатов взаимодействия оптического (в том числе лазерного) излучения и биологических тканей. Для этого проводится зондирование тканей и органов пациента оптическим излучением и регистрируется отраженный (рассеянный, прошедший ткань насквозь, переизлученный в форме флуоресценции и т. п.) свет.

К методам ОНД, все чаще используемым в медицинской практике, относятся методы спектроскопии: флуоресцентная спектроскопия (ФС); спектроскопия диффузного отражения (СДО), в том числе разработанные на ее основе методы оптической тканевой оксиметрии (ОТО), пульсо-

ксиметрии (ПО) (существует и в варианте спектроскопии диффузного пропускания) и спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИКС); спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия); методы динамического рассеяния света – лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ), диффузионно-волновая спектроскопия, видеокапилляроскопия (ВКС) и др. Каждый из них имеет свои особенности и возможности применения. Современной тенденцией в развитии биомедицинской диагностики является мультипараметрический подход, когда в одной диагностической технологии комбинируются различные оптические методы исследования. Это позволяет получить высокоэффективные диагностические инструменты для онкологии [9, 10], эндокринологии [11], хирургии [12] и других областей медицины, где необходимо определение параметров перфузионно-метаболического статуса тканей.

Целью настоящей статьи является описание метода и устройства для оценки функционального состояния МТС организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики и оценка их диагностического потенциала в клинической практике.

Комплексное исследование функционального состояния МТС организма человека с помощью нескольких методов ОНД.

Метод ЛДФ. ЛДФ в настоящее время является хорошо отработанным неинвазивным методом измерения микрососудистой перфузии крови [1, 13]. Метод базируется на зондировании биологических тканей низкоинтенсивным лазерным излучением красной или инфракрасной области длин волн с последующей регистрацией обратнорассеянного излучения (рис. 1). Информация о динамических параметрах микроциркуляции крови извлекается из спектра мощности фототока. Характеризовать состояние МТС методом ЛДФ можно, анализируя параметр перфузии кровотока (называемый также

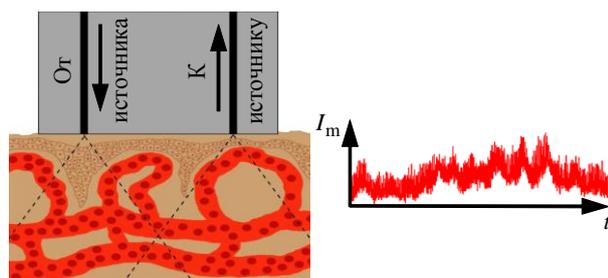


Рис. 1. Принцип лазерной доплеровской флоуметрии

Fig. 1. The principle of the laser doppler flowmetry

индексом микроциркуляции I_m), пропорциональный концентрации и скорости движения рассеивающих свет форменных элементов крови, главным образом эритроцитов. Дополнительные возможности при диагностике МТС дает проведение спектрального разложения ЛДФ-сигнала с помощью различных приемов частотного анализа (анализ Фурье, вейвлет-анализ). Такой подход делает возможным анализ осцилляций кровотока δI_m , отражающих действие различных механизмов регуляции периферического кровотока в широком диапазоне частот (0.0095...1.6 Гц). В настоящее время выделяют несколько основных частотных диапазонов, учитывающих влияние различных механизмов регуляции: эндотелиальные ($\delta I_{mэ}$) в диапазоне 0.0095...0.02 Гц, отражающие NO-зависимые влияния [14]; нейрогенные ($\delta I_{mн}$) в диапазоне 0.021...0.046 Гц, отражающие влияние нейрогенной симпатической вазомоторной активности [15, 16]; общие миогенные ($\delta I_{mм}$) в диапазоне 0.047...0.145 Гц, связанные с активностью гладкомышечных клеток сосудов [17]; а также дыхательные ($\delta I_{мд}$) в диапазоне 0.2...0.4 Гц и пульсовые ($\delta I_{мп}$) в диапазоне 0.8...1.6 Гц, отражающие влияние дыхания и сердечных сокращений соответственно [14]. Стоит также отметить, что в рамках общего миогенного диапазона выделяют колебания сенсорного пептидергического генеза (0.047...0.069 Гц) и собственно миогенные колебания (0.07...0.145 Гц). Кроме того, анализ указанных ритмов позволяет рассчитать нутритивный кровоток (δI_{mnt}) – ту часть кровотока, из которой в процессе трансапиллярного перехода извлекаются питательные вещества.

Главным преимуществом ЛДФ является неинвазивность и способность количественно (хотя и относительно – в перфузионных единицах) оценивать параметры микроциркуляции крови в режиме реального времени. Однако этот метод имеет и некоторые ограничения, основными из которых являются влияние оптических свойств тканей и артефактов движения на регистрируемый сигнал, а также отсутствие абсолютных количественных единиц измерения перфузии. Эти ограничения мотивируют к поиску вариантов улучшения метода ЛДФ как со стороны приборной реализации, так и в методологических аспектах.

Для повышения воспроизводимости, достоверности и информативности диагностики методом ЛДФ, а также для оценки состояния регуляторных механизмов кровотока и выявления скрытых нарушений МТС в настоящее время общепринято применять различные функциональные нагрузочные (провокационные) пробы (ФП). К наиболее широко используемым совместно с методом ЛДФ функциональным тестам относят [1]: температурные пробы с нагревом [18] (тепловая проба – ТП) или охлаждением [19] (холодовая проба – ХП, холодовая прессорная проба – ХПП), окклюзионные пробы (ОП) [20] с окклюзией артериальных (артериальная окклюзионная) и венозных сосудов (венозная окклюзионная), с глубоким вдохом и задержкой дыхания (дыхательная проба – ДП) и другие, которые способны вызвать известный физиологический ответ в локальной микрогемодинамике и дают возможность оценивать не только общее функциональное состояние микроциркуляторного русла, но и его резервные и адаптивные возможности. Температурные пробы требуют инструментальной реализации в одном устройстве с диагностическим каналом ЛДФ, чтобы максимально гарантировать нагрев или охлаждение диагностического объема биологической ткани.

Метод ФС. ФС основана на зондировании биологического объекта излучением в видимой или ультрафиолетовой области спектра с целью возбуждения эндогенных и экзогенных флуоресцирующих биомаркеров ткани и регистрации спектров флуоресценции (рис. 2) [21]. Количество, распределение и микроокружение эндогенных флуорофоров, присутствующих в клетках и тканях, влияют на общий сигнал автофлуоресцентной эмиссии и находятся в тесной взаимосвязи с метаболизмом и структурной организацией тканей в нормальных, измененных или пато-

логических условиях. Таким образом, регистрируемый в ФС сигнал – интенсивность эндогенной флуоресценции I_f – содержит большое количество диагностической информации и может быть мощным инструментом для разработки *in vivo* неинвазивных или минимально инвазивных диагностических устройств, при этом не требуя введения экзогенных маркеров.

Применение ФС в клинической практике основано на различиях в интенсивности и спектральном составе флуоресценции здоровых и измененных тканей при возбуждении лазерным излучением в ультрафиолетовом или видимом диапазоне спектра. Флуорофоры, участвующие в превращениях, происходящих при патологических изменениях, представляют собой аминокислоты триптофан и тирозин, структурные белки коллаген и эластин, кофакторы NADH, FAD (флавины) и порфирин [22]. NADH и FAD являются важными участниками энергетического метаболизма клеток, следовательно, мониторинг их флуоресценции (например, их соотношения в виде редокс-отношения RR) может быть использован для выявления метаболических нарушений МТС. Эти эндогенные флуорофоры, а также коллаген могут служить биомаркерами для изучения опухолевых тканей [23], накопления конечных продуктов гликирования (КПГ) при диабете [24], состояния кожных покровов в дерматологии [25], а также многих других задач широкого круга биомедицинских исследований [26].

Метод ФС имеет ограничение, так как свет, используемый для диагностики *in vivo*, может воздействовать на органы и ткани. В частности, ультрафиолетовое излучение (в частности, средней (MUV) и дальней (FUV) областей спектра) может вызвать фототоксические повреждения. Безопасность измерений в живых тканях может быть обеспечена ограничением как мощности светового излучения (несколько милливатт на квадратный метр), так и времени проведения диагностических процедур.

Метод СДО. СДО является неинвазивным методом оптической диагностики, предназначенным для измерения поглощающих и рассеивающих свойств оптически неоднородных сред, таких, как биологические ткани, при освещении их источником белого света (рис. 3) [27]. Спектральный состав отраженного кожей излучения I_r несет специфическую количественную информацию о структуре биологических тканей, количестве и кровенаполнении кровеносных сосудов, пространственном

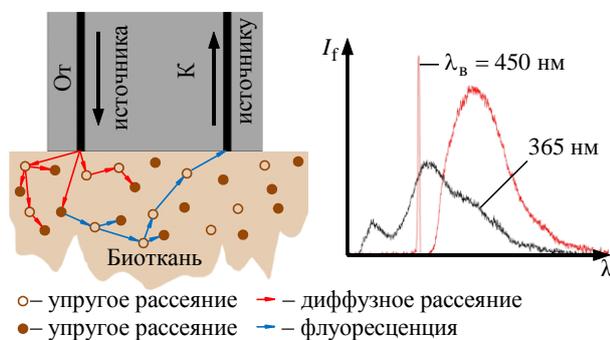


Рис. 2. Принцип флуоресцентной спектроскопии (λ_b – длина волны возбуждающего излучения)

Fig. 2. The principle of the fluorescence spectroscopy (λ_b – wavelength of the excitation light)

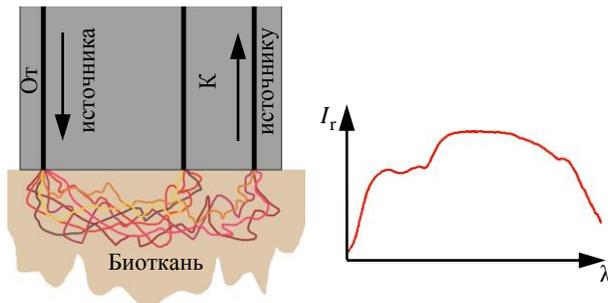


Рис. 3. Принцип спектроскопии диффузного отражения
Fig. 3. The principle of the diffuse reflectance spectroscopy

распределении хромофоров внутри ткани и их концентрации. Известно, что в результате прекращения нормального функционирования МТС при различных заболеваниях нарушается кровоснабжение, развивается тканевая гипоксия, изменяется состав и субклеточная морфология ткани. Эти состояния приводят к изменению спектральных характеристик вследствие сдвига концентрации основных хромофоров: оксигемоглобина, дезоксигемоглобина, воды, жира, желчи – что можно неинвазивно диагностировать с помощью СДО. Метод СДО используется во многих клинических областях и является полезным для идентификации ткани или оценки ее состава [28].

Для анализа спектров диффузного отражения используют упрощенные модели и более сложные математические алгоритмы для вычисления оптических свойств биологических тканей, которые позволяют количественно оценить степень покраснения кожи (эритемы – E) и процент содержания в ней основных хромофоров, таких, как оксигемоглобин (HbO_2), восстановленный гемоглобин (Hb), меланин, вода и др.

Методом ОТО, по сути базирующимся на принципах СДО, оценивается тканевая сатурация ($S_t\text{O}_2$) крови в микроциркуляторном русле, содержащем артериолы с оксигенированной кровью и венулы с дезоксигенированной, т. е. определяется сатурация смешанной крови. Данным методом также оценивается относительный объем фракции эритроцитов V_b в области исследования. Таким образом, при совместном применении методов ОТО и ПО, в которой оценивается артериальная сатурация $S_a\text{O}_2$, представляется возможным рассчитать комплексные параметры тканевого дыхания (например, показатель экстракции кислорода (oxygen extraction – OE) и показатель скорости потребления кислорода

(oxygen consumption – OC)), что важно при оценке функционального состояния МТС.

Мультипараметрическая оптическая диагностика функционального состояния МТС организма человека. Перспективным направлением для неинвазивной диагностики кровоснабжения и жизнеобеспечения биологических тканей является применение технологий ОНД в сочетании. Так, метод ЛДФ дает возможность неинвазивно исследовать гемодинамические параметры периферического кровотока, а использование методов ФС и СДО дополнит диагностику информацией о морфологических и биохимических изменениях в ткани. Стоит подчеркнуть, что метод СДО необходим для коррекции регистрируемых спектров флуоресценции с целью уменьшения эффекта поглощения и рассеяния поглощателей и рассеивателей, присутствующих в ткани [29]. Кроме того, в последнее время успешно применяется подход, основанный на сочетании методов ОНД и вспомогательных (неоптических) методов (например, [30]), позволяющих более системно оценивать функциональное состояние МТС при различных заболеваниях, а также повысить информативность диагностической процедуры за счет повышения чувствительности и специфичности.

На основе обширного анализа литературных данных (например, [1–6, 11–18, 21]) синтезирована структурная схема (рис. 4) предлагаемого мультипараметрического подхода, отражающая взаимосвязь основных параметров и состояний МТС при различных заболеваниях с некоторыми широко применяемыми методами ОНД, позволяющими в сочетании виде диагностировать сразу несколько функциональных состояний МТС. На схеме показаны изменения параметров при различных заболеваниях (увеличение \uparrow , уменьшение \downarrow , возможность разнонаправленного изменения $\uparrow\downarrow$).

Таким образом, согласно разработанной схеме мультипараметрического подхода в зависимости от задач исследования тех или иных состояний МТС при различных заболеваниях предлагается применять в сочетании виде соответствующие методы ОНД. Указанный подход позволяет зарегистрировать нужный набор параметров МТС, на базе которых возможно комплексно оценить их функциональное состояние. Также стоит отметить, что в некоторых случаях в методы и устройства мультипараметрической диагно-

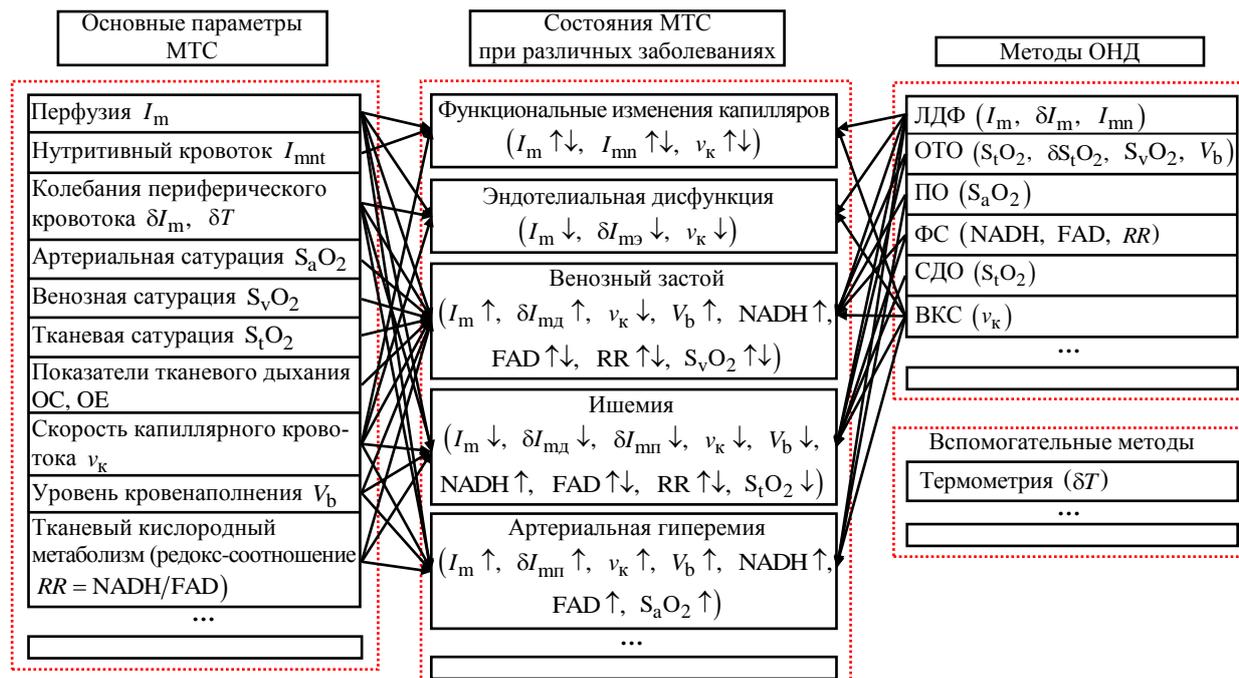


Рис. 4. Структурная схема мультипараметрического подхода для оценки функционального состояния МТС

Fig. 4. The block diagram of the multiparametric approach for assessing the functional state of the microcirculatory tissue systems

стики возможно добавлять вспомогательные (неоптические) методы (например, контактную термометрию или термографию), хорошо зарекомендовавшие себя в исследовании микроциркуляторного русла [20].

Для повышения информативности и точности обоснованным направлением совершенствования методологии мультипараметрического подхода является применение ранее описанных функциональных проб. Сочетание нескольких взаимодополняющих методов ОНД с одновременным проведением ФП (например, ОП, ТП, ХП или ХПП) дает более ценную и воспроизводимую диагностическую информацию для оценки функционального состояния МТС. Кроме того, сочетанное применение нескольких методов ОНД позволяет в конечном итоге получить составной диагностический критерий (решающее правило – РП), с помощью которого возможно классифицировать наличие или отсутствие нарушений в МТС с более высокими статистическими показателями (чувствительность/специфичность) по отношению к применению методов ОНД по отдельности.

На основе предложенного подхода был разработан один из вариантов устройства для оптической диагностики кровоснабжения и жизнеобеспечения биологических тканей.

Устройство для оценки функционального состояния МТС организма человека на основе

мультипараметрической оптической диагностики. Структурная схема одного из вариантов устройства для оценки функционального состояния МТС организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики, использующего 3 метода ОНД: ЛДФ, ФС и СДО, приведена на рис. 5.

Оптико-электронная система ЛДФ выполнена в виде двух идентичных каналов регистрации доплеровского сигнала и включает в себя лазерный источник излучения с длиной волны 1064 нм, соединенный с драйвером, задающим питание, и оптико-электронную систему регистрации вторичного оптического излучения, состоящую из фотодиодов ФД с оптическими фильтрами, последовательно попарно соединенных с блоком формирования доплеровского сигнала, состоящего из преобразователей ток-напряжение ПТН, усилителей сигнала У и аналого-цифровых преобразователей АЦП. В каждом канале реализовано последовательное преобразование сигнала.

Каналы ФС и СДО включают в себя источники возбуждения флуоресценции с длинами волн 365 и 450 нм, соединенные с драйверами, задающими питание, широкополосный источник излучения, полихроматор П, набор сменных светофильтров Ф и ПЗС-приемник излучения. Полихроматор построен по симметричной скрещенной схеме Черни–Тернера с плоской дифракционной решеткой.

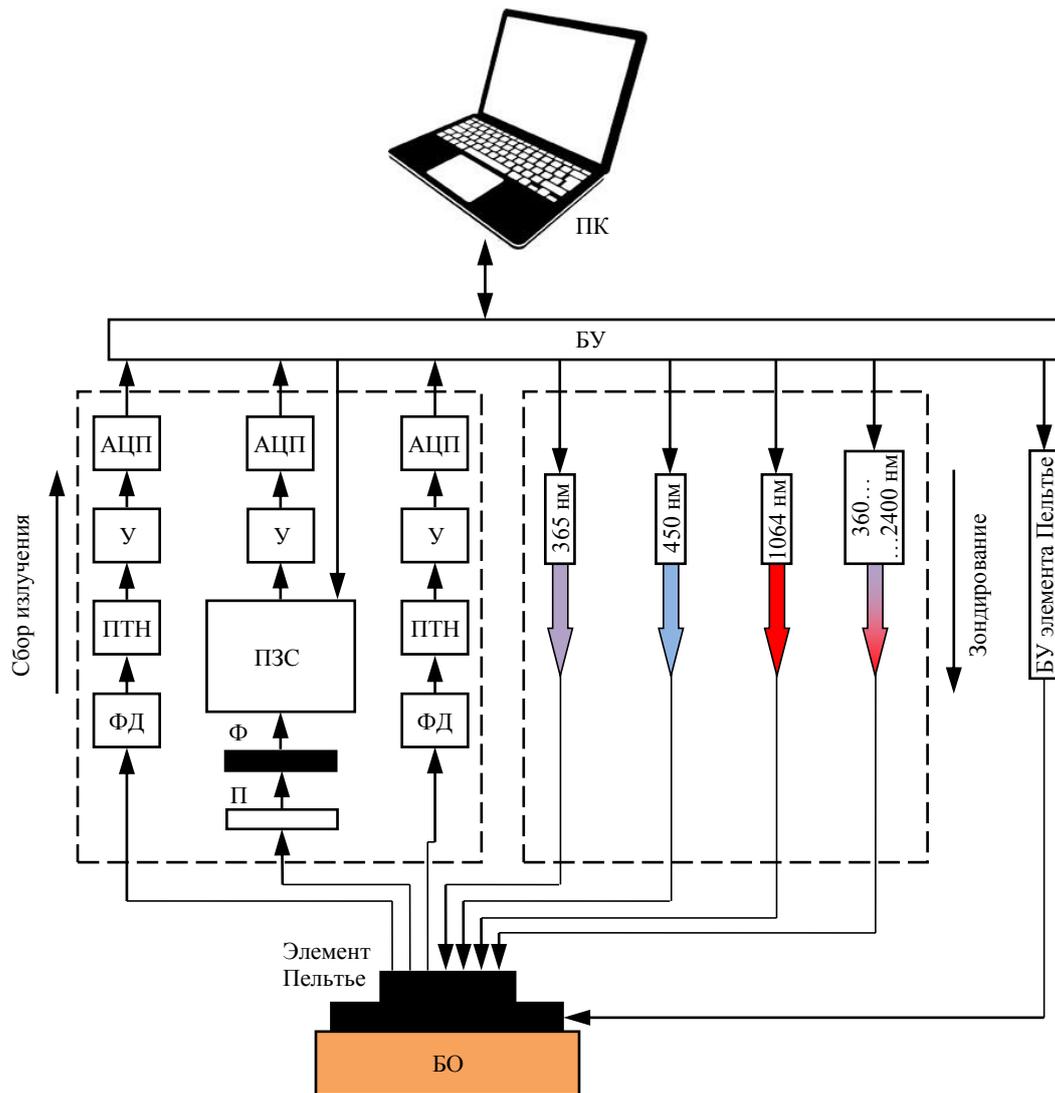


Рис. 5. Структурная схема устройства для оценки функционального состояния МТС организма человека
 Fig. 5. Block diagram of the device for assessing the functional state of the human body microcirculatory tissue systems

Управление каналами осуществляется общим блоком управления БУ, представляющим собой ПЛИС с обвязкой, связанную через интерфейс с персональным компьютером ПК. БУ управляет работой излучателей (подачей управляющих сигналов на их драйверы) и включением широкополосного источника излучения. В качестве источников первичного оптического излучения используются лазерные излучатели с длинами волн 450 и 1064 нм, светодиод с длиной волны 365 нм и широкополосный источник излучения с диапазоном длин волн 360...2400 нм. Свет от этих источников передается по волоконному жгуту к области исследования биологического объекта БО. Сигналы флуоресценции, диффузного отражения и доплеровский сигнал принимаются близкорасположенными приемными волокнами. При необходимости проведения температурных

проб через БУ подключается дополнительный канал температурного воздействия, построенный на элементе Пельтье с собственным блоком управления, позволяющим менять полярность питающего напряжения. С помощью данного канала реализуется проведение функционального температурного теста в диапазоне 5...42 °С.

Система транспортировки облучающих и отраженных от БО излучений выполнена в виде передающих оптоволоконных линий от источников излучения и приемных оптоволоконных линий к приемникам, которые собраны в жгут с общим наконечником. Жгут содержит 7 волокон: 4 передающих (1 – для канала ЛДФ, 1 – для канала СДО, 2 – для канала ФС) и 3 принимающих (2 – для канала ЛДФ, 1 – для каналов СДО и ФС). При необходимости проведения температурных проб волоконный жгут помещается в блок Пельтье.

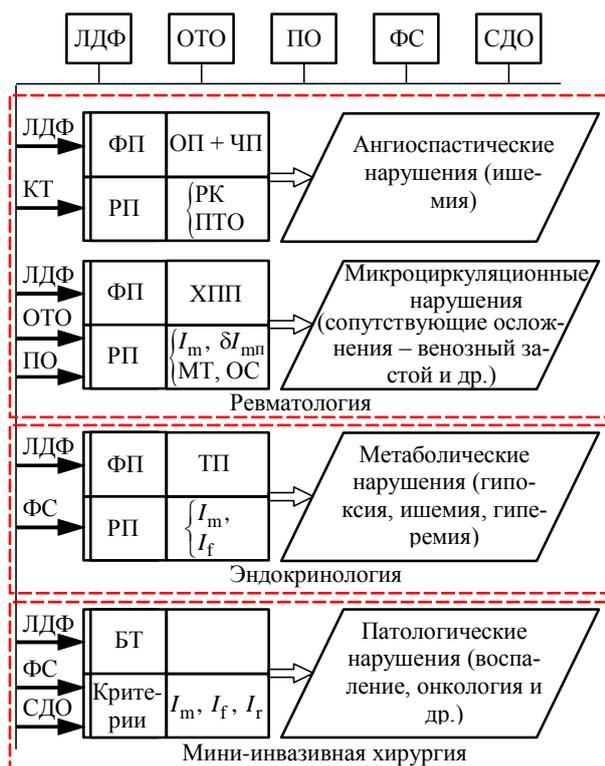


Рис. 6. Примеры реализации мультипараметрической диагностики в клинической практике

Fig. 6. Examples of the implementation of multiparameter diagnostics in clinical practice

Связь пользователя с БУ осуществляется через специализированную программу, установленную на ПК. В программе предусмотрена визуализация и обработка полученных спектров флуоресценции, диффузного отражения и амплитудно-частотных спектров ЛДФ. Программа позволяет в автоматическом режиме проводить одновременную регистрацию параметров, учитывать уровень шума, подбирать необходимую экспозицию в зависимости от уровня сигнала, а также осуществлять вейвлет-анализ полученных амплитудно-частотных спектров ЛДФ.

Результаты и обсуждение применения мультипараметрической диагностики в клинической практике. Представленный в настоящей статье подход (и разработанный на его основе вариант устройства) возможно использовать в

биомедицинских исследованиях и клинической практике различных патологических состояний, в том числе в эндокринологии, дерматологии, ревматологии, онкологии и др. В зависимости от поставленных задач могут быть задействованы как все диагностические методы и каналы устройства, так и их часть, а также использоваться дополнительные (не оптические) каналы, например контактной термометрии. На базе мультипараметрического подхода (см. рис. 4) на рис. 6 схематично показаны примеры реализации предлагаемой методологии в клинической практике. Следует подчеркнуть, что во всех представленных примерах РП получено на основе линейного дискриминантного анализа.

К настоящему времени завершено совместное исследование в БУЗ Орловской области "Орловская областная клиническая больница" (ООКБ), в котором оценивались возможности метода мультипараметрической диагностики в оценке микроциркуляторно-тканевых нарушений в нижних конечностях пациентов с СД при проведении ТП (с температурой 35 и 42 °С) [31]. В работе анализировался составной критерий, основанный на параметрах, полученных на основе сигналов ЛДФ и ФС кожных покровов стоп. Получены статистически значимые различия в перфузии и в нормированных амплитудах флуоресценции для групп больных с язвами в количестве $n = 14$, без язв ($n = 62$) и условно здоровых добровольцев ($n = 48$). Согласно полученным для предлагаемого метода статистическим данным (таблица) продемонстрировано, что объединение информации о микроциркуляции крови (данные ЛДФ) и метаболических процессах (ФС) в сочетании с различными режимами ТП повышает диагностические возможности ОНД при выявлении осложнений как при проявлении первичных признаков диабета, когда патологические изменения еще обратимы, так и при наличии уже имеющихся нарушений. Получаемые данные могут быть использованы для предотвращения усугубления

Статистические показатели разработанных методов мультипараметрической диагностики

Statistical indicators of the developed methods of multiparametric diagnostics

№	Диагностика	Применяемые методы	Чувствительность	Специфичность	AUC
1	Нарушение тканевого метаболизма у пациентов с СД [31]	ЛДФ + ФС (при ТП)	0.92	0.90	0.93
2	Функциональное состояние периферических сосудов у пациентов с РЗ [33]	ЛДФ + КТ (при ОП/ХП)	0.87	0.74	0.88
3	Микроциркуляторные нарушения (склонность к ангиоспазму) у пациентов с РЗ [34]	ЛДФ + ОТО (при ХПП)	0.92	0.97	0.92

течения болезни и для подбора адекватной коррекции лечения.

Следует особо отметить, что известны примеры применения в подобных задачах диагностики метода ЛДФ (например, [32]) с чувствительностью 0.93, специфичностью 0.91 и площадью под ROC-кривой (AUC) 0.65, однако с относительно плохой воспроизводимостью.

Кроме того, в настоящее время также завершены совместные исследования с ООКБ, в которых оценивались возможности применения представленного подхода в оценке микроциркуляторно-тканевых нарушений в верхних конечностях пациентов с РЗ. В данных исследованиях применялись две различные модификации мультипараметрического подхода – методы ЛДФ и контактной (накожной) термометрии (КТ) в сочетании с комбинированными ФП (ОП и ХП) [33], а также методы ЛДФ и ОТО с ХПП [34]. В первом варианте РП базировалось на составном критерии, включающем параметр "резервный кровоток" (РК) из ЛДФ и параметр "показатель температурного отклика" (ПТО) из КТ. В основную группу входили пациенты с РЗ ($n = 41$), в контрольную группу – добровольцы ($n = 27$). Во втором варианте модификации метода для выявления причин микроциркуляторных нарушений (например, в виде венозного застоя или миогенно-застойных причин) РП базировалось на составном критерии, включающем перфузию I_m и амплитуду пульсовых колебаний кровотока $\delta I_{мп}$, а также значение миогенного тонуса МТ и показателя скорости потребления кислорода ОС, рассчитываемого на основе методов ОТО и ПО. Для указанного варианта в основную группу входили пациенты с РЗ ($n = 60$), а контрольную группу составляли добровольцы ($n = 32$).

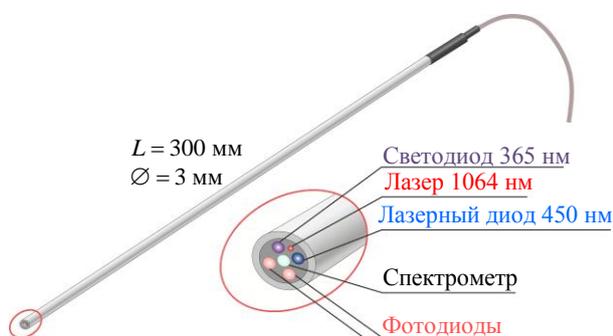


Рис. 7. Оптоволоконный зонд для оптической мультипараметрической диагностики при проведении мини-инвазивных вмешательств

Fig. 7. Fiber optic probe for optical multiparametric diagnostics for minimally invasive interventions

Необходимо отметить, что известны примеры применения в подобных задачах диагностики метода ЛДФ (например, для выявления микроциркуляторных нарушений у пациентов с синдромом Рейно) [35] с чувствительностью 0.79, специфичностью 0.90 и AUC 0.92. Однако в описанном решении невозможно оценить тканевое дыхание и выявить причины микроциркуляторных нарушений.

Стоит отметить [36], что во всех представленных примерах разработанных методов мультипараметрической диагностики получены достаточно высокие статистические показатели (см. таблицу).

Также интересные результаты были получены в ходе исследования, где проводилась мультипараметрическая оптическая диагностика патологических перфузионно-метаболических нарушений органов гепатопанкреатодуоденальной зоны методами ФС и ЛДФ [37]. Отличительной особенностью данного исследования была разработка специального оптического зонда (длиной 30 см и диаметром 3 мм), предназначенного для получения информации от области интереса с помощью стандартных инструментов для проведения минимально инвазивных вмешательств (рис. 7). Полученные в исследовании данные продемонстрировали статистически значимые различия в максимумах интенсивности флуоресценции и средней перфузии (регистрировался базальный кровоток в виде базового теста – БТ) в органах с различной патологией. Предложенный мультипараметрический подход является перспективным и может быть использован в качестве инструментального метода для оценки состояния тканей и слизистых оболочек органов брюшной полости.

Еще одним направлением в мультипараметрической диагностике с использованием описанного в данной работе подхода, активно развиваемым в последнее время, является использование метода флуоресцентно-отражательной спектроскопии для диагностики очаговых и диффузных новообразований при проведении чрескожной биопсии. Для данных исследований также был разработан специальный волоконно-оптический зонд длиной 25 см диаметром менее 1 мм, позволяющим вводить его в медицинские иглы для аспирационной биопсии и подвергать стерилизации. Разработанный зонд (рис. 8) имеет торцевой скос 20° , что обеспечивает максимальный контакт рабочей поверхности зонда с тканями и поз-

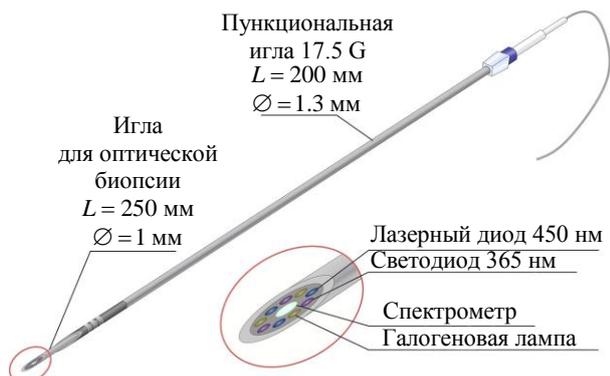


Рис. 8. Опволоконный зонд для оптической мультипараметрической диагностики при проведении чрескожной биопсии

Fig. 8. Fiber optic probe for optical multiparametric diagnostics during percutaneous biopsy

воляет оператору проводить ряд последовательных измерений в области интереса, вращая зонд внутри иглы.

Предварительно полученные результаты на спонтанной и инициированной опухолях лабораторных животных свидетельствуют о высокой диагностической эффективности метода в дифференциации неизменных и опухолевых тканей [38].

Заключение. Комплексное применение оптических неинвазивных методов диагностики

имеет большой потенциал для выявления микроциркуляторных и метаболических нарушений и оценки их тяжести. В статье описаны метод и устройство для оценки функционального состояния МТС организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики, позволяющие одновременно регистрировать микрогемодинамические параметры методом ЛДФ, спектры флуоресценции основных флуорофоров NADH и FAD, отражающих метаболическую активность биологических тканей методом ФС, а также спектры диффузного отражения, несущие информацию о морфологической структуре и оптических характеристиках биотканей методом СДО, в практически одном диагностическом объеме с возможностью проведения температурных проб. Эти методы вместе или отдельно могут иметь важное диагностическое значение в различных клинических областях медицины. Принцип работы предложенного устройства с возможностью его технической адаптации посредством разработки дополнительных зондов для конкретных задач исследования делает проведение подобной диагностики более доступным и повышает ее информативность.

Список литературы

1. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей. М: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 496 с.
2. Diabetes-associated macrovasculopathy: Pathophysiology and pathogenesis / S. Rahman, T. Rahman, A. A. S. Ismail, A. R. A. Rashid // Diabetes, Obesity and Metabolism. 2007. Vol. 9, № 6. P. 767-780. doi: 10.1111/j.1463-1326.2006.00655.x
3. Юшков П. В., Опаленов К. В. Морфогенез микроангиопатий при сахарном диабете // Сахарный диабет. 2001. № 1. doi: 10.14341/2072-0351-6109
4. Благинина И. И. Поражение системы микроциркуляции в зависимости от активности воспалительного процесса у больных ревматоидным артритом // Украинський ревматологічний журнал. 2008. С. 30-33.
5. Cutaneous vascular alterations in psoriatic patients treated with cyclosporine / G. Stinco, S. Lautieri, F. Valent, P. Patrone // Acta Derm. Venereol. 2007. Vol. 87, № 2. P. 152-154. doi: 10.2340/00015555-0216
6. Multiple pathogenic roles of microvasculature in inflammatory bowel disease: A jack of all trades / L. Deban, C. Correale, S. Vetrano, A. Malesci, S. Danese // American Journal of Pathology. 2008. Vol. 172, № 6. P. 1457-1466. doi: 10.2353/ajpath.2008.070593
7. Родин А. В., Плешков В. Г. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки при острой кишечной непроходимости // Вестн. Смоленской гос. мед. академии. 2016. Т. 15, № 1.
8. Bigio I. J., Mourant J. R. Optical biopsy // Encycl. Opt. Eng. 2003. Vol. 1577. P. 1593. doi: 10.1081/E-EOE120009717
9. Мультимодальная диагностика и визуализация онкологических патологий / В. П. Захаров, И. А. Братченко, О. О. Мякинин, Д. Н. Артемьев, Д. В. Корнилин, С. В. Козлов, А. А. Морятов // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 8. С. 726-731.
10. Диагностика пигментированных кожных новообразований методами лазерно-индуцированной автофлуоресцентной и диффузной отражательной спектроскопии / Е. Борисова, П. Троянова, П. Павлова, Л. Аврамов // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 6. С. 597-605. doi: 10.1070/QE2008v038n06ABEH013891
11. Early changes in the skin microcirculation and muscle metabolism of the diabetic foot / R. L. Greenman, S. Panasyuk, X. Wang, T. E. Lyons, T. Dinh, L. Longoria, J. M. Giurini, J. Freeman, L. Khaodhiar, A. Veves // Lancet. 2005. Vol. 366, № 9498. P. 1711-1717. doi: 10.1016/S0140-6736(05)67696-9
12. Early prediction of skin viability using visible dif-

fuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy / C. Zhu, S. Chen, C. H. K. Chui, B. K. Tan, Q. Liu // *Plast. Reconstr. Surg.* 2014. Vol. 134, № 2. P. 240e-247e. doi: 10.1097/PRS.0000000000000399.

13. Fredriksson I., Fors C., Johansson J. Laser doppler flowmetry – a theoretical framework // *Dep. Biomed. Eng. Linköping Univ.* 2007. P. 6–7.

14. Oscillations in the human cutaneous blood perfusion signal modified by endothelium-dependent and endothelium-independent vasodilators / H. D. Kvernmo, A. Stefanovska, K. A. Kirkeboen, K. Kvernebo // *Microvasc. Res.* 1999. Vol. 57, № 3. P. 298–309. doi: 10.1006/mvre.1998.2139

15. Involvement of sympathetic nerve activity in skin blood flow oscillations in humans / T. Söderström, A. Stefanovska, M. Veber, H. Svensson // *Am. J. Physiol.* 2003. Vol. 284, № 5. P. H1638–H1646. doi: 10.1152/ajpheart.00826.2000

16. Крупаткин А. И. Влияние симпатической иннервации на тонус микрососудов и колебания кровотока кожи // *Физиология человека.* 2006. Т. 32, № 5. С. 584–592. doi: 10.1134/S0362119706050136

17. Крупаткин А. И. Колебания кровотока частотой около 0.1 Гц в микрососудах кожи не отражают симпатическую регуляцию их тонуса // *Физиология человека.* 2009. Т. 35, № 2. С. 183–191. doi: 10.1134/S036211970902008X

18. Roustit M., Cracowski J.-L. Assessment of endothelial and neurovascular function in human skin microcirculation // *Trends Pharmacol. Sci.* 2013. Vol. 34, № 7. P. 373–384. doi: 10.1016/j.tips.2013.05.007

19. Effect of local cold provocation on systolic blood pressure and skin blood flow in the finger / S. Bornmyr, J. Castenfors, E. Evander, G. Olsson, U. Hjortsberg, P. Wollmer // *Clin. Physiol.* 2001. Vol. 21, № 5. P. 570–575. doi: 10.1046/j.1365-2281.2001.00364.x

20. Сагайдачный А. А. Оклюзионная проба: методы анализа, механизмы реакции, перспективы применения // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2018. Т. 17, № 3. С. 5-22. doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-5-22

21. Рогаткин Д. А. Физические основы лазерной клинической флуоресцентной спектроскопии in vivo // *Медицинская физика.* 2014. Т. 4, № 64. С. 78–96.

22. NAD(P)H and collagen as in vivo quantitative fluorescent biomarkers of epithelial precancerous changes / I. Georgakoudi, B. C. Jacobson, M. G. Müller, E. E. Sheets, K. Badizadegan, D. L. Carr-Locke, C. P. Crum, C. W. Boone, R. R. Dasari, J. Van Dam, M. S. Feld // *Cancer Res.* 2002. Vol. 62, № 3. P. 682–687.

23. In vivo native fluorescence spectroscopy and nicotinamide adenine dinucleotide/flavin adenine dinucleotide reduction and oxidation states of oral submucous fibrosis for chemopreventive drug monitoring / S. Sivabalan, C. P. Vedeswari, S. Jayachandran, D. Koteswaran, C. Pravda, P. Aruna, S. Ganesan // *J. Biomed. Opt.* 2010. Vol. 15, № 1. P. 017010. doi: 10.1117/1.3324771

24. Fokkens B. T., Smit A. J. Skin fluorescence as a clinical tool for non-invasive assessment of advanced glycation and long-term complications of diabetes // *Glycoconj. J.* 2016. Vol. 33, № 4. P. 527–535. doi: 10.1007/s10719-016-9683-1

25. Галкина Е. М., Утц С. Р. Флуоресцентная диагностика в дерматологии // *Саратовский науч.-мед. журн.* 2013. Т. 9, № 3.

26. Спектрометр для флуоресцентно-отражательных биомедицинских исследований / К. Ук, В. Б. Березин, Г. В. Папаян, Н. Н. Петрищев, М. М. Галагудза // *Опт. журн.* 2013. Т. 80, № 1. С. 56–67.

27. Тучин В. В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2 т.: учеб. издание. 2007. 559 с.

28. Diffuse reflectance spectroscopy for monitoring diabetic foot ulcer – A pilot study / S. Anand, N. Sujatha, V. B. Narayanamurthy, V. Seshadri, R. Poddar // *Opt. Lasers Eng.* 2014. Vol. 53. P. 1–5. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.020

29. Bradley R. S., Thorniley M. S. A review of attenuation correction techniques for tissue fluorescence // *J. R. Soc. Interface.* 2006. Vol. 3, № 6. P. 1. doi: 10.1098/rsif.2005.0066

30. Combined use of laser Doppler flowmetry and skin thermometry for functional diagnostics of intradermal finger vessels / E. A. Zherebtsov, A. I. Zherebtsova, A. Doronin, A. V. Dunaev, K. V. Podmasteryev, A. Vykov, I. Meglinski // *J. Biomed. Opt.* 2017. Vol. 22, № 4. P. 40502. doi: 10.1117/1.JBO.22.4.040502

31. Комплексный подход к неинвазивной оценке микроциркуляторно-тканевых нарушений в стопах пациентов с сахарным диабетом методами спектроскопии / Е. В. Потапова, В. В. Дреммин, Е. А. Жеребцов, И. Н. Маковик, Е. В. Жарких, А. В. Дунаев, О. В. Пилипенко, В. В. Сидоров, А. И. Крупаткин // *Оптика и спектроскопия.* 2017. Т. 123, № 6. С. 946–956.

32. A new method of screening for diabetic neuropathy using laser Doppler and photoplethysmography / S. W. Kim, S. C. Kim, K. C. Nam, E. S. Kang, J. J. Im, D. W. Kim // *Med Biol Eng Comput.* 2008. Vol. 46, № 1. P. 61–67. doi: 10.1007/s11517-007-0257-z

33. Метод и устройство диагностики функционального состояния периферических сосудов верхних конечностей / А. И. Жеребцова, Е. А. Жеребцов, А. В. Дунаев, К. В. Подмастерьев, А. В. Коськин, О. В. Пилипенко // *Мед. техника.* 2017. № 1. С. 33–37.

34. Detection of angiospastic disorders in the microcirculatory bed using laser diagnostics technologies / I. N. Makovik, A. V. Dunaev, V. V. Dremmin, A. I. Krupatkin, V. V. Sidorov, L. S. Khakhicheva, V. F. Muradyan, O. V. Pilipenko, I. E. Rafailov, K. S. Litvinova // *J. Innov. Opt. Health Sci.* 2018. Vol. 11, № 01. P. 1750016. doi: 10.1142/S179354581750016X

35. Postocclusive Hyperemia Measured with Laser Doppler Flowmetry and Transcutaneous Oxygen Tension in the Diagnosis of Primary Raynaud's Phenomenon: A Prospective, Controlled Study / P. Maga, B. M. Henry,

E. K. Kmiotek, I. Gregorczyk-Maga, P. Kaczmarczyk, K. A. Tomaszewski, R. Niżankowski // Biomed Res. Int. 2016. Vol. 2016. P. 9645705. doi: 10.1155/2016/9645705

36. Multimodal Optical Diagnostics of the Microhaemodynamics in Upper and Lower Limbs / A. I. Zhrebtsova, V. V. Dremin, I. N. Makovik, E. A. Zhrebtsov, A. V. Dunaev, A. Goltsov, S. G. Sokolovski, E. U. Rafailov // Front. Physiol. 2019. Vol. 10. Art. 416. doi: 10.3389/fphys.2019.00416

37. Fiber-Optic System for Intraoperative Study of Abdominal Organs during Minimally Invasive Surgical

Interventions / K. Kandurova, V. Dremin, E. Zhrebtsov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin, Y. Ivanov, A. Borsukov, A. Dunaev // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, № 2. Art. 217. doi: 10.3390/app9020217

38. Optical fine-needle biopsy approach for intraoperative multimodal diagnostics in minimally invasive abdominal surgery / K. Kandurova, E. Potapova, V. Shupletsov, I. Kozlov, E. Seryogina, V. Dremin, E. Zhrebtsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11079. P. 1107948. doi: 10.1117/12.2526747

Информация об авторе

Дунаев Андрей Валерьевич – кандидат технических наук (2002), доцент (2007) кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация", ведущий научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники Орловского государственного университета им. И. С. Тургенева. Автор более 150 научных статей. Сфера научных интересов – биомедицинское приборостроение, биомедицинская фотоника, оптическая неинвазивная диагностика.

Адрес: ФГБОУ ВО " Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева", ул. Комсомольская, д. 95, г. Орел, 302026, Россия

E-mail: dunaev@bmecenter.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4431-6288>

References

1. Krupatkin A. I., Sidorov V. V. *Funkcional'naja diagnostika sostojanija mikrocirkuljatornotkanevyh sistem: kolebanija, informacija, nelinejnost': rukovodstvo dlja vrachej* [Functional diagnostics of the state of microcirculatory-tissue systems: fluctuations, information, non-linearity: a guide for doctors]. Moskva: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2013, 496 p. (In Russ.)

2. Rahman S., Rahman T., Ismail A. A. S., Rashid A. R. A. Diabetes-associated macrovasculopathy: Pathophysiology and pathogenesis. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2007, vol. 9, no. 6, pp. 767-780. doi: 10.1111/j.1463-1326.2006.00655.x

3. Yushkov P. V., Opalenov K. V. Morfogenez mikroangiopatij pri sakharnom diabete. *Diabetes mellitus*. 2001, vol. 4, no. 1, pp. 53-56. (In Russ.) doi: 10.14341/2072-0351-6109

4. Blaginina I. I. The violation of the microcirculation system depending on the activity of the inflammatory process in patients with rheumatoid arthritis. *Ukrains'kij revmatologichnij zhurnal* [Ukrainian rheumatology journal]. 2008, pp. 30-33. (In Russ.)

5. Stinco G., Lautieri S., Valent F., Patrone P. Cutaneous vascular alterations in psoriatic patients treated with cyclosporine. *Acta Derm. Venereol*, 2007, vol. 87, no. 2, pp. 152-154. doi: 10.2340/00015555-0216

6. Deban L., Correale C., Vetrano S., Malesci A., Danese S. Multiple pathogenic roles of microvasculature in inflammatory bowel disease: A jack of all trades. *American Journal of Pathology*. 2008, vol. 172, no. 6, pp. 1457-1466. doi: 10.2353/ajpath.2008.070593

7. Rodin A. V., Pleshkov V. G. Intraoperative assessment of intestinal viability in acute intestinal obstruction. *Vestnik Smolenskoy gosudarstvennoj medicinskoj akad-*

emii [Bulletin of the Smolensk State Medical Academy]. 2016, vol. 15, no. 1. (In Russ.)

8. Bigio I. J., Mourant J. R. Optical biopsy. *Encycl. Opt. Eng.* 2003, vol. 1577, pp. 1593. doi: 10.1081/E-EOE120009717

9. Zakharov V. P., Bratchenko I. A., Myakinin O. O., Artemyev D. N., Kornilin D. V., Kozlov S. V. E., Moryatov A. A. Multimodal diagnosis and visualisation of oncologic pathologies. *Quantum Electronics*. 2014, vol. 44, no. 8, pp. 726-731. doi: 10.1070/QE2014v044n08ABEH015545

10. Borisova E., Troyanova P., Pavlova P., Avramov L. Diagnostics of pigmented skin tumors based on laser-induced autofluorescence and diffuse reflectance spectroscopy. *Quantum Electron*. 2008, vol. 38, no. 6, pp. 597-605. doi: 10.1070/QE2008v038n06ABEH013891

11. Greenman R. L., Panasyuk S., Wang X., Lyons T. E., Dinh T., Longoria L., Giurini J. M., Freeman J., Khaodhiar L., Veves A. Early changes in the skin microcirculation and muscle metabolism of the diabetic foot. *Lancet*. 2005, vol. 366, no. 9498, pp. 1711-1717. doi: 10.1016/S0140-6736(05)67696-9

12. Zhu C., Chen S., Chui C. H. K., Tan B. K., Liu Q. Early prediction of skin viability using visible diffuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy. *Plast. Reconstr. Surg.* 2014, vol. 134, no. 2, pp. 240e-247e. doi: 10.1097/PRS.0000000000000399

13. Fredriksson I., Fors C., Johansson J. Laser doppler flowmetry – a theoretical framework. *Dep. Biomed. Eng. Linköping Univ.* 2007, pp. 6-7.

14. Kvernmo H. D., Stefanovska A., Kirkebøen K. A., Kvernebo K. Oscillations in the human cutaneous blood perfusion signal modified by endothelium-dependent and endothelium-independent vasodilators. *Microvasc.*

Res. 1999, vol. 57, no. 3, pp. 298–309. doi: 10.1006/mvre.1998.2139

15. Söderström T., Stefanovska A., Veber M., Svensson H. Involvement of sympathetic nerve activity in skin blood flow oscillations in humans. *Am. J. Physiol.* 2003, vol. 284, no. 5, pp. H1638–H1646. doi: 10.1152/ajpheart.00826.2000

16. Krupatkin A. I. The influence of the sympathetic innervation on the skin microvascular tone and blood flow oscillations. *Human physiology.* 2006, vol. 32, no. 5, pp. 584–592. doi: 10.1134/S0362119706050136

17. Krupatkin A. I. Blood flow oscillations at a frequency of about 0.1 Hz in skin microvessels do not reflect the sympathetic regulation of their tone. *Human physiology.* 2009, vol. 35, no. 2 pp. 183–191. doi: 10.1134/S036211970902008X

18. Roustit M., Cracowski J.-L. Assessment of endothelial and neurovascular function in human skin microcirculation. *Trends Pharmacol. Sci.* 2013, vol. 34, no. 7, pp. 373–384. doi: 10.1016/j.tips.2013.05.007

19. Bornmyr S., Castenfors J., Evander E., Olsson G., Hjortsberg U., Wollmer P. Effect of local cold provocation on systolic blood pressure and skin blood flow in the finger. *Clin. Physiol.* 2001, vol. 21, no. 5, pp. 570–575. doi: 10.1046/j.1365-2281.2001.00364.x

20. Sagaidachnyi A. A. Reactive hyperemia test: methods of analysis, mechanisms of reaction and prospects. *Regional blood circulation and microcirculation.* 2018, vol. 17, no. 3, pp. 5–22. (In Russ.) doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-5-22

21. Rogatkin D. A. Physical fundamentals of in vivo laser clinical fluorescence spectroscopy. *Medicinskaja fizika* [Medical physics]. 2014, vol. 4, no. 64, pp. 78–96. (In Russ.)

22. Georgakoudi I., Jacobson B. C., Müller M. G., Sheets E. E., Badizadegan K., Carr-Locke D. L., Crum C. P., Boone C. W., Dasari R. R., Van Dam J., Feld M. S. NAD(P)H and collagen as in vivo quantitative fluorescent biomarkers of epithelial precancerous changes. *Cancer Res.* 2002, vol. 62, no. 3, pp. 682–687.

23. Sivabalan S., Vedeswari C. P., Jayachandran S., Kotteeswaran D., Pravda C., Aruna P., Ganesan S. In vivo native fluorescence spectroscopy and nicotinamide adenine dinucleotide/flavin adenine dinucleotide reduction and oxidation states of oral submucous fibrosis for chemopreventive drug monitoring. *J. Biomed. Opt.* 2010, vol. 15, no. 1, pp. 017010. doi: 10.1117/1.3324771

24. Fokkens B. T., Smit A. J. Skin fluorescence as a clinical tool for non-invasive assessment of advanced glycation and long-term complications of diabetes. *Glycoconj. J.* 2016, vol. 33, no. 4, pp. 527–535. doi: 10.1007/s10719-016-9683-1

25. Galkina E. M., Utc S. R. Fluorescence diagnosis in dermatology. *Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal* [Saratov Journal of Medical Scientific Research]. 2013, vol. 9, no. 3. (In Russ.)

26. Uk K., Berezin V. B., Papayan G. V., Petrishchev N. N., Galagudza M. M. Spectrometer for fluorescence-

reflection biomedical research. *Journal of Optical Technology.* 2013, vol. 80, no. 1, pp. 40–48. doi: 10.1364/JOT.80.000040

27. Tuchin V. V. *Opticheskaja biomeditsinskaja diagnostika: v 2-h t.: uchebnoe izdanie* [Optical biomedical diagnostics: in 2 volumes: textbook]. 2007, 559 p. (In Russ.)

28. Anand S., Sujatha N., Narayanamurthy V. B., Seshadri V., Poddar R. Diffuse reflectance spectroscopy for monitoring diabetic foot ulcer – A pilot study. *Opt. Lasers Eng.* 2014, vol. 53, pp. 1–5. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.020

29. Bradley R. S., Thorniley M. S. A review of attenuation correction techniques for tissue fluorescence. *J. R. Soc. Interface.* 2006, vol. 3, no. 6, pp. 1. doi: 10.1098/rsif.2005.0066

30. Zherebtsov E. A., Zherebtsova A. I., Doronin A., Dunaev A. V., Podmasteryev K. V., Bykov A., Meglinski I. Combined use of laser Doppler flowmetry and skin thermometry for functional diagnostics of intradermal finger vessels. *J. Biomed. Opt.* 2017, vol. 22, no. 4, pp. 40502. doi: 10.1117/1.JBO.22.4.040502

31. Potapova E. V., Dremin V. V., Zherebtsov E. A., Makovik I. N., Zharkikh E. V., Dunaev A. V., Pilipenko O. V., Sidorov V. V., Krupatkin A. I. A Complex Approach to Noninvasive Estimation of Microcirculatory Tissue Impairments in Feet of Patients with Diabetes Mellitus using Spectroscopy. *Optics and Spectroscopy.* 2017, vol. 123, no. 6, pp. 955–964. doi: 10.1134/S0030400X1712013X

32. Kim S. W., Kim S. C., Nam K. C., Kang E. S., Im J. J., Kim D. W. A new method of screening for diabetic neuropathy using laser Doppler and photoplethysmography. *Med Biol Eng Comput.* 2008, vol. 46, no. 1, pp. 61–67. doi: 10.1007/s11517-007-0257-z

33. Zherebtsova A. I., Zherebtsov E. A., Dunaev A. V., Podmasteryev K. V., Koskin A. V., Pilipenko O. V. A Method and a Device for Diagnostics of the Functional State of Peripheral Vessels of the Upper Limbs. *Biomedical Engineering.* 2017, vol. 51, no. 1, pp. 46–51. doi: 10.1007/s10527-017-9682-y

34. Makovik I. N., Dunaev A. V., Dremin V. V., Krupatkin A. I., Sidorov V. V., Khakhicheva L. S., Muradyan V. F., Pilipenko O. V., Rafailov I. E., Litvinova K. S. Detection of angiospastic disorders in the microcirculatory bed using laser diagnostics technologies. *J. Innov. Opt. Health Sci.* 2018, vol. 11, no. 01, pp. 1750016. doi: 10.1142/S179354581750016X

35. Maga P., Henry B. M., Kmiotek E. K., Gregorczyk-Maga I., Kaczmarczyk P., Tomaszewski K. A., Nizankowski R. Postocclusive Hyperemia Measured with Laser Doppler Flowmetry and Transcutaneous Oxygen Tension in the Diagnosis of Primary Raynaud's Phenomenon: A Prospective, Controlled Study. *Biomed Res. Int.* 2016, vol. 2016, pp. 9645705. doi: 10.1155/2016/9645705.36

36. Zherebtsova A. I., Dremin V. V., Makovik I. N., Zherebtsov E. A., Dunaev A. V., Goltsov A., Sokolovski S. G., Rafailov E. U. Multimodal Optical Diagnostics of the Microhaemodynamics in Upper and Lower Limbs. *Front. Physiol.* 2019, vol. 10, art. 416. doi: 10.3389/fphys.2019.00416

37. Kandurova K., Dremin V., Zherebtsov E., Potapova E., Alyanov A., Mamoshin A., Ivanov Y., Borsukov A., Dunaev A. Fiber-Optic System for Intraoperative Study of Abdominal Organs during Minimally Invasive Surgical Interventions. Appl. Sci. 2019, vol. 9, no. 2, art. 217. doi: 10.3390/app9020217

38. Kandurova K., Potapova E., Shupletsov V., Kozlov I., Seryogina E., Dremin V., Zherebtsov E., Alekseyev A., Mamoshin A., Dunaev A. Optical fine-needle biopsy approach for intraoperative multimodal diagnostics in minimally invasive abdominal surgery. Proc. SPIE. 2019, vol. 11079, pp. 1107948. doi: 10.1117/12.2526747

Information about the author

Andrey V. Dunaev, Ph.D., Docent (2002), Docent of Instrumentation (2007), Metrology and Certification Department, Leading Researcher of Research and Development Center of Biomedical Photonics at Orel State University named after I. S. Turgenev. The author of more than 150 scientific papers. Area of expertise: biomedical engineering, biomedical photonics, optical non-invasive diagnostics.

Address: Orel State University n. a. I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya St., Orel 302026, Russia

E-mail: dunaev@bmecenter.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4431-6288>

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 23 № 4 2020

Vol. 23 No. 4 2020

Научный редактор А. М. Мончак
Редактор Э. К. Долгатов
Компьютерная верстка И. О. Буяновой

Science Editor A. M. Monchak
Editor E. K. Dolgatov
DTP Professional I. O. Buyanova

Подписано в печать 29.09.20. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 12,48. Усл.-печ. л. 12,0. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 76.

Signed to print 29.09.20. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 12,48. Conventional printed sheets 12,0. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 76.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ETU Publishing house
5 Prof. Popov St., St Petersburg 197376, Russia