



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 27 № 5 2024



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 27 No. 5 2024

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2024

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

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

Издается 6 раз в год.

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

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

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

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург,

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

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Matthias A. HEIN, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Prof.,

Технический университет, Ильменау, Германия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

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

Журнал выполняет следующие задачи:

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

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

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



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



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

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

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

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

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

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EXECUTIVE SECRETARY

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

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Научные статьи

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

Кузнецов Ю. В., Баев А. Б., Коновалюк М. А., Горбунова А. А.

Разделение циклостационарных сигналов и наводок в линиях передачи печатных плат методом независимых компонент.....6

Телевидение и обработка изображений

Обухова Н. А., Мотыко А. А., Чиркунова А. А., Поздеев А. А., Литвинов Е. А.

Автоматический захват и сопровождение объектов интереса в видеоданных с глобальным движением.....24

Радиолокация и радионавигация

Лаптев К. Ю., Соколов Н. В., Михайлов В. Н., Богачев М. И., Воробьев Е. Н.

Определение характеристик морской поверхности по радиолокационным изображениям с использованием градиентных методов.....41

Микро- и нанoeлектроника

Мироненко И. Г., Соколов С. С., Иванов А. А. Плоские диэлектрические волноводы

терагерцового диапазона и дифракционные антенны на их основе.....54

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

Цырульников Л. А., Фролов Д. А., Сафин А. Р. Взаимная синхронизация ансамблей

спинтронных наноосцилляторов.....65

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

Потрахов Н. Н., Ростачев С. А., Ладожская-Гапеенко Е. Е., Гук К. К.

Многофункциональный тепловизионный комплекс для медицинской диагностики.....77

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

Биндер Я. И., Хазов И. А. Адаптивный к траектории скважины универсальный

гириноклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости.....91

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

Суфэльфа А. Р., Вознесенский А. С., Каплун Д. И. Сглаживание поверхностей 3D-моделей

протезно-ортопедических изделий.....108

Васильева Д. В., Дворников С. В., Дворников С. С. Обоснование структуры форматов

изображений для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге.....118

От редакции

Некролог.....129

Правила для авторов статей.....130

CONTENTS

Original articles

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

Kuznetsov Yu. V., Baev A. B., Konovalyuk M. A., Gorbunova A. A.

Separation of Cyclostationary Signals and Interference in Transmission Lines
of Printed Circuit Boards Based on Independent Component Analysis.....6

Television and Image Processing

Obukhova N. A., Motyko A. A., Chirkunova A. A., Pozdeev A. A., Litvinov E. A. Automatic

Detection and Tracking of Objects of Interest in Video Data with Global Motion.....24

Radar and Navigation

Laptev K. Yu., Sokolov N. V., Mikhailov V. N., Bogachev M. I., Vorobev E. N. Measurement

of Sea Surface Characteristics from Radar Images Using Gradient Methods.....41

Micro- and Nanoelectronics

Mironenko I. G., Sokolov S. S., Ivanov A. A. Flat Dielectric Waveguides of the Terahertz Range

and Diffraction Antennas on Their Basis.....54

Quantum, Solid-State, Plasma and Vacuum Electronics

Tsyrlunikova L. A., Frolov D. A., Safin A. R. Mutual Synchronization of Spintronic Nano-Oscillator

Ensembles.....65

Measuring Systems and Instruments

Based on Acoustic, Optical and Radio Waves

Potrakhov N. N., Rostachev S. A., Ladozhskaya-Gapeenko E. E., Guk K. K.

Multifunctional Thermal Imaging Complex for Medical Diagnostics.....77

Metrology, Information and Measuring Devices and Systems

Binder Ya. I., Khazov I. A. A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory,

Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor.....91

Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

Sufelfa A. R., Voznesensky A. S., Kaplun D. I. Mesh Smoothing of 3D Prosthesis

and Orthosis Models.....108

Vasilieva D. V., Dvornikov S. V., Dvornikov S. S. Justification of Image Format Structure

for Solving Pattern Recognition Problems in Environmental Monitoring.....118

From the Editor

Obituary.....129

Author's Guide.....130

Разделение циклостационарных сигналов и наводок в линиях передачи печатных плат методом независимых компонент

Ю. В. Кузнецов, А. Б. Баев[✉], М. А. Коновалюк, А. А. Горбунова

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

[✉] baev@mai.ru

Аннотация

Введение. При разработке и тестировании высокоскоростных линий связи цифровых электронных устройств проводится контроль формы электрических сигналов и наводок в линиях передачи с использованием глазковых диаграмм. В настоящее время контроль осуществляется с использованием многоканальных измерительных приборов, позволяющих определять форму импульсных сигналов и связанных с ними импульсных перекрестных помех.

Цель работы. Разработка способа слепой идентификации модели неизвестного сигнала, измеренного цифровым осциллографом в микрополосковых линиях передачи.

Материалы и методы. В работе использована модель сигнала, представляющего собой сумму информационного сигнала, межсимвольной интерференции и перекрестной помехи от соседней линии передачи в предположении статистической независимости символов их источников. Реализованный способ слепой идентификации позволил выполнить разделение трех компонент сигнала и определить их парциальные импульсные отклики. Предложенная процедура оценки характеристик модели сигнала включает в себя предварительную обработку измеренных данных с использованием метода главных компонент и последующий анализ независимых компонент на основе статистических характеристик четвертого порядка.

Результаты. В статье представлены результаты параллельной и независимой обработки экспериментальных данных, измеренных в микрополосковых линиях передачи двух близкорасположенных печатных плат, демонстрирующие эффективность предложенного способа разделения сигналов. Проведено сравнение методов слепого разделения сигналов на основе статистик второго порядка, кумулянтов четвертого порядка и метода независимых компонент. Результаты проведенного моделирования показали, что для произвольной формы парциальных импульсов метод независимых компонент обеспечивает наилучшее качество восстановления.

Заключение. Разработанный способ слепой идентификации параметров сигналов, измеренных в высокоскоростных линиях связи цифровых электронных устройств, позволит расширить функционал систем проектирования и тестирования многоканальных проводных линий связи.

Ключевые слова: перекрестная помеха, метод слепой идентификации, метод главных компонент, циклостационарный процесс, кумулянт четвертого порядка

Для цитирования: Разделение циклостационарных сигналов и наводок в линиях передачи печатных плат методом независимых компонент / Ю. В. Кузнецов, А. Б. Баев, М. А. Коновалюк, А. А. Горбунова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 6–23. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-6-23

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.06.2024; принята к публикации после рецензирования 16.07.2024; опубликована онлайн 29.11.2024

Separation of Cyclostationary Signals and Interference in Transmission Lines of Printed Circuit Boards Based on Independent Component Analysis

Yury V. Kuznetsov, Andrey B. Baev✉,
Maxim A. Konovalyuk, Anastasia A. Gorbunova

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ baev@mai.ru

Abstract

Introduction. When developing and testing high-speed communication links of digital electronic devices, the pulse shape of electrical signals and interference in transmission lines is commonly controlled using eye diagrams. Partial pulse responses are estimated by modern multi-channel testing and measuring equipment using specific testing procedures.

Aim. To develop an approach to blind identification of a wireline communication signal measured by a digital oscilloscope in microstrip transmission lines.

Materials and methods. The study was carried out using a communication signal model composed of a superposition of the information signal, intersymbol interference, and crosstalk interference from an adjacent transmission line, with the symbols of these signal sources being assumed statistically independent. The implemented blind identification method makes it possible to separate three components of the signal and evaluate their partial pulse responses. The proposed procedure for signal separation includes preliminary processing of the data measured by principal component analysis followed by an analysis of independent components based on fourth-order statistical characteristics.

Results. The performance of the proposed signal separation method is demonstrated using the results of parallel and independent data processing measured in microstrip transmission lines in an experimental setup with two closely spaced printed circuit boards. A comparison of blind signal separation methods is carried out based on second-order statistics, fourth-order cumulants, and independent component analysis. The proposed method of independent component analysis demonstrated the highest efficiency in terms of minimum bit error probability for blind signal separation with arbitrary partial pulse responses, which was confirmed by simulation results.

Conclusion. The developed approach to blind identification of wireline signal parameters measured in high-density integrated digital electronic devices extends the range of systems for circuit design and testing of multi-channel high-speed communication lines.

Keywords: crosstalk, blind identification method, principal component analysis, cyclostationary process, fourth order cumulant

For citation: Kuznetsov Yu. V., Baev A. B., Konovalyuk M. A., Gorbunova A. A. Separation of Cyclostationary Signals and Interference in Transmission Lines of Printed Circuit Boards Based on Independent Component Analysis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 6–23. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-6-23

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

Submitted 14.06.2024; accepted 16.07.2024; published online 29.11.2024

Введение. При разработке высокотехнологичных электронных устройств требуется проведение измерений временных характеристик и контроль целостности сигналов в линиях передачи данных в полосе частот до десятков гигагерц [1]. Одним из самых важных этапов разработки цифрового электронного устройства явля-

ется создание современных версий технических спецификаций на высокоскоростные линии связи, необходимые для передачи электрических сигналов по проводникам печатных плат [2].

Нарушение целостности сигналов в проводных интерфейсах может приводить к снижению скорости передачи данных и существенному

замедлению функционирования электронного устройства. Контроль целостности сигнала осуществляется для оптимизации передатчика и приемника в проводной системе связи и заключается в определении характеристик информационного сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), перекрестных помех и межсимвольной интерференции [3]. Анализ характеристики сигналов и помех в линиях передачи проводится во временной области с применением методов статистической обработки [4].

Наблюдаемые синхронно с частотой следования символов случайные импульсные отклики в линии передачи принято представлять контрольными глазковыми диаграммами. Случайные изменения формы наблюдаемых откликов обусловлены межсимвольной интерференцией – наложением переходных процессов, формирующих фронты предшествующих импульсов, и перекрестными помехами, вызванными наводками от параллельных каналов передачи данных.

В описываемом исследовании рассмотрен случай последовательной передачи бинарных данных в дуплексном канале связи. В каждой линии канала связи данные независимых источников передаются асинхронно и с одинаковой скоростью. На рис. 1 представлены примеры

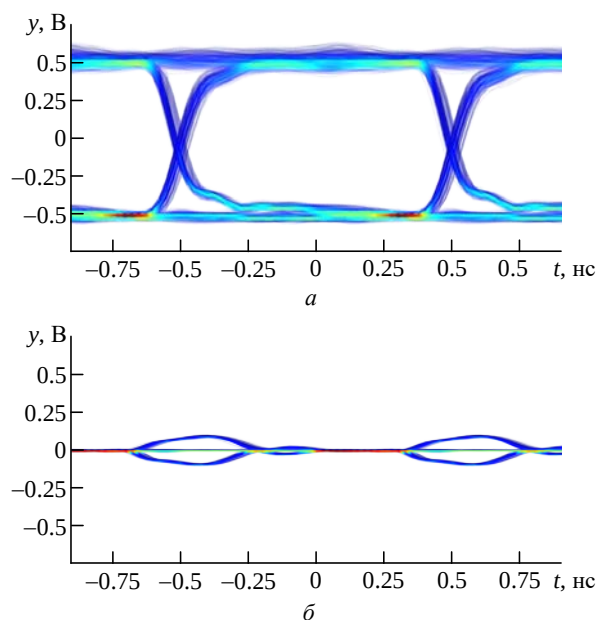


Рис. 1. Глазковые диаграммы в двухканальной линии при одноканальной передаче: a – сигнал в канале 1; b – наводка в канале 2

Fig. 1. Eye diagrams in a two-channel link with single-link transmission: a – signal in channel 1; b – crosstalk in channel 2

реализаций глазковых диаграмм сигналов в двухканальной линии при одноканальной передаче. В этом случае (рис. 1, b) в канале 2 наблюдается сигнал наводки, обусловленный передачей данных в канале 1. При асинхронной передаче данных по двум каналам (рис. 2) в каждом канале наблюдаются искажения, вызванные перекрестными помехами от соседнего канала.

Импульсные отклики для сигналов и помех, наблюдаемые на интервале времени, ограниченном длительностью одного символа информации, принято называть парциальными откликами или импульсами [5]. Парциальные импульсы могут быть использованы для формирования модели сигнала, наблюдаемого в линии передачи. Основными составляющими модели являются информационный сигнал, межсимвольная интерференция и перекрестная помеха.

Данное исследование посвящено решению задачи оценки характеристик модели сигнала, измеренного в высокоскоростной линии передачи. В качестве характеристик выбраны форма парциальных откликов и последовательность передаваемых символов для каждой из трех составляющих модели в отдельности. Полученные характеристики предлагается использовать для восстановления трех сигналов в линии переда-

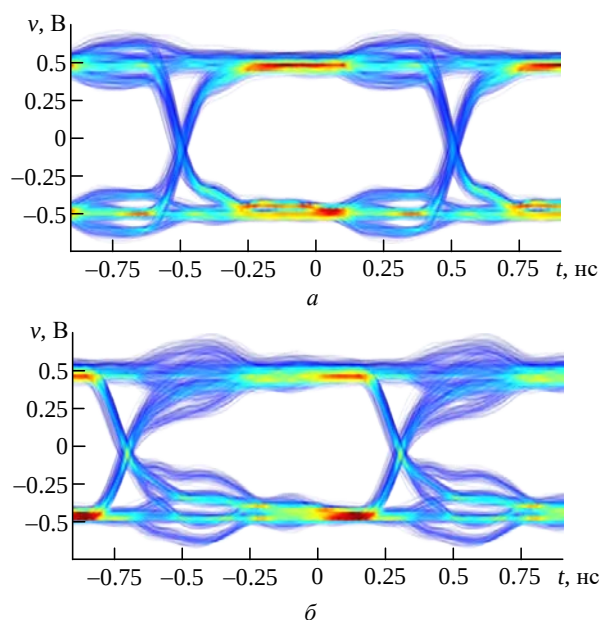


Рис. 2. Глазковые диаграммы в двухканальной линии при двухканальной асинхронной передаче: a – сигнал с наводкой в канале 1; b – сигнал с наводкой в канале 2

Fig. 2. Eye diagrams in a two-channel link with double-link asynchronous transmission: a – signal with crosstalk in channel 1; b – signal with crosstalk in channel 2

чи: информационного сигнала, сигнала межсимвольной интерференции и перекрестной помехи.

При высокоскоростной последовательной передаче данных в проводных линиях связи широко используются сигналы с АИМ. В большинстве современных электронных устройств информационные символы предварительно преобразуются для последовательной передачи по каналам связи с использованием скремблера и кодера. Эти преобразования предназначены для стационаризации статистических характеристик символического потока, а сам поток данных может рассматриваться как стационарный дискретный случайный процесс. Поток кодированных цифровых данных модулирует по амплитуде импульсы. Простейшей моделью потока данных является упорядоченная последовательность независимо и одинаково распределенных случайных величин. При этом формируемый сигнал с АИМ, а также сигналы с другими видами кодоимпульсной модуляции обладают свойствами циклостационарности [6, 7] с циклическим периодом, равным интервалу следования импульсов.

АИМ-сигнал анализируется с использованием глазковых диаграмм на одном или нескольких циклических периодах. На диаграммах отображается синхронный ансамбль реализаций случайного процесса. Согласно теореме Карунена–Лоэва [8], главными компонентами ансамбля являются ортогональные функции, с помощью которых представляется циклостационарный процесс и его автокорреляционная функция. Коэффициентами разложения случайного процесса в базисе ортогональных функций являются некоррелированные координаты или, иначе, линейно независимые случайные величины.

Для описания наблюдаемого на одном циклическом периоде сигнала, искаженного межсимвольной интерференцией и перекрестной помехой, можно воспользоваться простейшей линейной моделью независимых компонент. Независимыми компонентами в рамках такой модели являются информационные символы и символы источников межсимвольной интерференции и перекрестных помех. Для описания соответствующей вероятностной модели может быть использован случайный вектор, объединяющий статистически независимые случайные величины.

Статистические характеристики вектора наблюдения широко освещены в литературе [9, 10], включая статистики четвертого порядка. В теоретическом разделе статьи представлено сравнение эквивалентных подходов к описанию кумулянтов четвертого порядка. Одним подходом является применение тензорных вычислений. Другой подход позволяет использовать линейную алгебру для матричного представления тензора. Для кумулянтов четвертого порядка следует также отметить значительное увеличение числа учитываемых элементов статистики по сравнению с корреляцией. Корреляционная матрица для случайного вектора с m координатами содержит m^2 взаимных корреляций координат. Тензор кумулянта четвертого порядка для этого вектора содержит m^4 взаимных кумулянтов четырех координат вектора.

В данной статье рассмотрены методы слепого разделения сигналов на основе моментов второго порядка, кумулянтов четвертого порядка и их комбинации. Выполнено сравнение представленных методов на модели сигнала в линии передачи при использовании ортогональных и неортогональных парциальных импульсов. По результатам моделирования предложен комбинированный способ для обработки экспериментальных данных, в которых парциальные импульсы информационного сигнала и наводки содержат как ортогональные, так и неортогональные отклики.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований сигналов в линии передачи данных с использованием методов главных и независимых компонент. Метод главных компонент использован на первом этапе статистической обработки измеренного сигнала для сокращения размерности пространства сигнала и определения некоррелированных координат вектора наблюдения. Метод независимых компонент позволил выполнить разделение сигналов, которое основано на статистической независимости символов источника сигнала в линии передачи и символов источника наводки. В результате анализа независимых компонент были определены формы парциальных импульсов и последовательности символов источников сигнала и наводки.

Модель сигнала. При последовательной

передаче бинарных данных в линиях передачи, образующих физическую среду канала связи, формируются электрические сигналы с двухуровневой АИМ. Интервал следования импульсов Δ обратно пропорционален скорости передачи бит. Длительность одиночного импульса превышает длительность интервала следования импульсов за счет переходных процессов в линии передачи, что влечет за собой появление межсимвольной интерференции в канале связи. Передача импульсных сигналов в двух близко расположенных линиях передачи формирует перекрестные помехи.

Таким образом, наблюдаемый сигнал в линии передачи может рассматриваться как аддитивная смесь передаваемого информационного сигнала, искаженного межсимвольной интерференцией, перекрестной помехи и шума [11]. Вероятность ошибочного приема информационного символа (ИС) $s_{ИС}(n)$, который передается в течение n -го интервала битовой последовательности по линии канала связи, увеличивается при росте уровня шумов и помех. Увеличение уровня шумов и помех относительно интенсивности АИМ-сигнала в линиях передачи вызывается, главным образом, не за счет внешних источников, а за счет увеличения скорости передачи данных, которое приводит к перетеканию мощности от полезных источников к источникам помех.

Источники непреднамеренных помех, синхронные с источником ИС, определяются символами межсимвольной интерференции (МСИ) $s_{МСИ}(n)$ и перекрестной помехи (ПП) $s_{ПП}(n)$. Наблюдаемые синхронно случайные символы ИС, МСИ и ПП считаются независимыми на n -м интервале битовой последовательности. Закон распределения вероятностей случайного процесса для каждой последовательности символов является стационарным в строгом смысле, что обусловлено предположением об одинаковом и независимом распределении вероятностей символов для соседних интервалов битовой последовательности. Последовательность ИС описывается процессом Бернулли. Символы МСИ и ПП характеризуются двумя различными законами распределений.

В рамках рассматриваемой модели сигнала символы трех источников могут быть объединены в случайный вектор:

$$\mathbf{s}(n) = [s_{ИС}(n) \ s_{МСИ}(n) \ s_{ПП}(n)]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1},$$

где T – операция транспонирования.

Детерминированные временные характеристики рассматриваемых синхронных источников случайных сигналов, наблюдаемые на интервале времени Δ , описываются парциальными импульсами [12, 13]. Для трех рассматриваемых синхронных источников на рис. 3 показаны формы парциальных импульсов информационного символа $a_{ИС}(t)$, межсимвольной интерференции $a_{МСИ}(t)$ и перекрестной помехи $a_{ПП}(t)$ и их суммарный отклик (рис. 3, б).

Парциальные импульсы в рассматриваемой модели формируют детерминированный вектор параметров:

$$\mathbf{a}(t) = [a_{ИС}(t) \ a_{МСИ}(t) \ a_{ПП}(t)]^T.$$

Размерность пространства парциальных импульсов определяется количеством главных компонент на интервале времени Δ и совпадает с размерностью пространства независимых источников.

Одиночная n -я компонента искаженного помехами АИМ-сигнала описывается линейной модуляцией вектора детерминированных им-

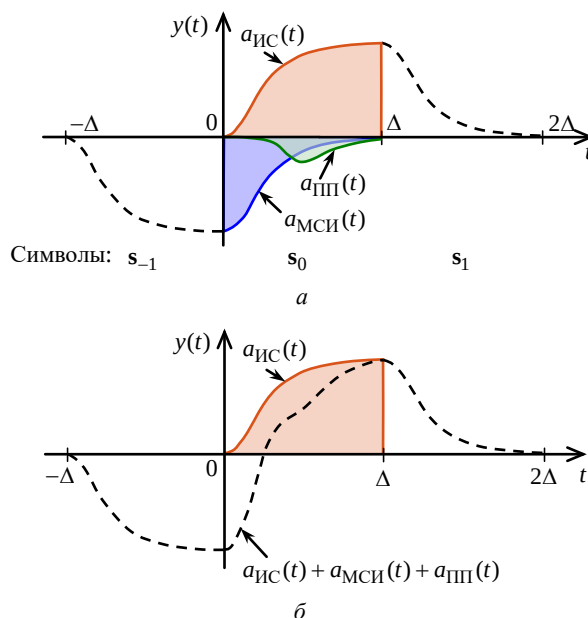


Рис. 3. Форма парциальных импульсов в линии передачи: а – ИС, МСИ и ПП; б – суммарный отклик

Fig. 3. The shape of partial pulses in the transmission line: а – information symbol, intersymbol interference and crosstalk; б – total response

пульсов $\mathbf{a}(t)$, задержанного на интервал времени $n\Delta$, случайным значением n -го вектора символов $\mathbf{s}(n)$. Таким образом, рассматриваемый АИМ-сигнал является непрерывным случайным циклостационарным сигналом с циклическим периодом Δ [14].

Наблюдаемый непрерывный циклостационарный сигнал в линии передачи $y(t)$ может быть представлен в виде скалярного произведения случайного вектора символов источников $\mathbf{s}(n)$ и детерминированного вектора $\mathbf{a}(t)$ парциальных импульсов в присутствии аддитивного шума $w(t)$ в следующем виде:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathbf{a}^T(t - n\Delta) \mathbf{s}(n) + w(t).$$

Вектор наблюдения $\mathbf{y}(n)$ объединяет M дискретных сигналов $\{y_i(n)\}_{i=1}^M$ следующим образом:

$$\mathbf{y}(n) = [y_1(n) \dots y_M(n)]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \quad (1)$$

где i -й элемент получен из сигнала $y(t)$ сдвигом по времени на $\tau_i = (i-1)\Delta/M$, $i=1, \dots, M$, с последующей дискретизацией с интервалом Δ :

$$y_i(n) = y(n\Delta + \tau_i) = \mathbf{a}^T(\tau_i) \mathbf{s}(n) + w(n\Delta + \tau_i).$$

Для исследования вектора наблюдения далее рассмотрены статистические характеристики первого, второго и четвертого порядка случайного вектора.

Статистические характеристики случайного вектора. При определении статистических характеристик случайных сигналов [15] широко используется их преобразование в случайный вектор, позволяющее использовать аппарат линейной алгебры. При этом для определения статистик четвертого порядка используются также тензоры четвертого порядка [10].

Если для случайного вектора $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_m]^T \in \mathbb{R}^m$ задана плотность вероятности $f_{\mathbf{x}}(\xi)$, то для i -й координаты x_i математическое ожидание функции $g(x_i)$ определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} E\{g(x_i)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi_i) f_{\mathbf{x}}(\xi) d^m \xi = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi_i) f_{x_i}(\xi_i) d\xi_i, \end{aligned}$$

где $f_{x_i}(\xi_i)$ – одномерная маргинальная плотность вероятности i -й координаты.

Случайный вектор $\mathbf{x}$ характеризуется нулевым вектором математических ожиданий, если

$$\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{x}} = E\{\mathbf{x}\} = \mathbf{0},$$

где $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ – нулевой вектор.

Взаимная корреляция i -й и j -й координат случайного вектора x_i и x_j является взаимным моментом второго порядка:

$$\begin{aligned} E\{x_i x_j\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \xi_i \xi_j f_{\mathbf{x}}(\xi) d^m \xi = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi_i \xi_j f_{x_i, x_j}(\xi_i, \xi_j) d\xi_i d\xi_j, \end{aligned}$$

где $f_{x_i, x_j}(\xi_i, \xi_j)$ – совместная двумерная плотность вероятности i -й и j -й координат.

Корреляционные свойства случайного вектора описываются с использованием корреляционной матрицы:

$$R_{\mathbf{xx}} = E\{\mathbf{xx}^T\} \in \mathbb{R}^{m \times m}.$$

Корреляционная матрица полного ранга $R_{\mathbf{xx}}$ представляется в виде собственных векторов $\{\mathbf{v}_p \in \mathbb{R}^{m \times 1}\}_{p=1}^m$ и собственных значений

$$\{\lambda_p\}_{p=1}^m:$$

$$R_{\mathbf{xx}} = \sum_{p=1}^m \lambda_p \mathbf{v}_p \mathbf{v}_p^T.$$

Для случайного вектора $\mathbf{w}$ с нулевым вектором математических ожиданий $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{w}} = \mathbf{0}$, координаты которого взаимно не коррелированы и имеют одинаковую мощность σ_w^2 , корреляционная матрица имеет диагональный вид:

$$R_{\mathbf{ww}} = \sigma_w^2 I,$$

где $I \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – единичная матрица.

Если для случайного вектора $\mathbf{x}$ с нулевым вектором математических ожиданий $\mu_{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ координаты вектора коррелированы, то определение вектора некоррелированных координат $\mathbf{z}$ выполняется с использованием следующего выражения:

$$\mathbf{z} = R_{\mathbf{xx}}^{-1/2} \mathbf{x} = \Lambda^{-1/2} V^T \mathbf{x},$$

где $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ – диагональная матрица собственных значений; $V = [v_1 \dots v_m]$ – матрица собственных векторов. Корреляционная матрица вектора некоррелированных координат $\mathbf{z}$ является единичной матрицей:

$$R_{\mathbf{zz}} = I.$$

Математическое ожидание для произведения четырех координат случайного вектора x_i, x_j, x_k и x_l является взаимным моментом четвертого порядка:

$$E\{x_i x_j x_k x_l\} = \int_{-\infty}^{\infty} \xi_i \xi_j \xi_k \xi_l f_{\mathbf{x}}(\xi) d^m \xi.$$

Современные вычислительные методы линейной алгебры хорошо развиты и реализованы в большинстве программ математических вычислений. Существуют также вычислительные программы, которые поддерживают математические операции с многомерными массивами. Такие математические операции не являются широко известными и требуются для описания статистических характеристик четвертого порядка для случайного вектора [10].

Произведение матрицы $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ и тензора $\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{I_1 \times \dots \times I_n \times \dots \times I_L}$ вдоль его n -го измерения обозначается символом $\times_n$ и определяется выражением для $(j_1 \dots j_n \dots j_L)$ -го элемента $(\mathcal{A} \times_n A) \in \mathbb{R}^{J_1 \times \dots \times J_n \times \dots \times J_L}$ следующим образом:

$$(\mathcal{A} \times_n A)_{j_1 \dots j_n \dots j_L} = \sum_{i_n=1}^N (A)_{j_n i_n} (\mathcal{A})_{j_1 \dots j_n \dots j_L},$$

где $I_n = N$ – число элементов тензора $\mathcal{A}$ вдоль n -го измерения; $J_n = M$ – число элементов

тензора $\mathcal{A} \times_n A$ вдоль n -го измерения; $J_{k \neq n} = I_{k \neq n}$; L – число измерений тензора.

Тензор кумулянта четвертого порядка $Q_{\mathbf{xxxx}} \in \mathbb{R}^{m \times m \times m \times m}$ для случайного вектора $\mathbf{x}$ с нулевым вектором математических ожиданий $\mu_{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_{\mathbf{xxxx}} = & E\{\mathbf{x} \times_2 \mathbf{x} \times_3 \mathbf{x} \times_4 \mathbf{x}\} - \\ & - E\{\mathbf{x} \times_2 \mathbf{x}\} \times_3 E\{\mathbf{x} \times_4 \mathbf{x}\} - \\ & - E\{\mathbf{x} \times_3 \mathbf{x}\} \times_2 E\{\mathbf{x} \times_4 \mathbf{x}\} - \\ & - E\{\mathbf{x} \times_4 \mathbf{x}\} \times_2 E\{\mathbf{x} \times_3 \mathbf{x}\}. \end{aligned}$$

Кумулянт четвертого порядка для случайного вектора $\mathbf{x}$ с нулевым вектором математических ожиданий $\mu_{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ можно определить с использованием квадроквариационной матрицы [9]. Квадроквариационная матрица $Q_{\mathbf{xxxx}} \in \mathbb{R}^{m^2 \times m^2}$ является матричным представлением тензора кумулянта четвертого порядка:

$$\begin{aligned} (Q_{\mathbf{xxxx}})_{(i-1)m+j, (k-1)m+l} &= (Q_{\mathbf{xxxx}})_{ijkl} = \\ &= E\{x_i x_j x_k x_l\} - E\{x_i x_j\} E\{x_k x_l\} - \\ &- E\{x_i x_k\} E\{x_j x_l\} - E\{x_i x_l\} E\{x_j x_k\}. \end{aligned}$$

Квадроквариационная матрица позволяет вычислить кумулянт с использованием статистических характеристик второго порядка для вектора, координаты которого связаны квадратичным преобразованием с координатами исходного вектора $\mathbf{x}$. Квадроквариационная матрица $Q_{\mathbf{xxxx}}$ случайного вектора $\mathbf{x}$ определяется разностью между ковариационной матрицей векторной функции преобразования $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m^2 \times 1}$ и математическим ожиданием матричной функции $G(\mathbf{xx}^T) \in \mathbb{R}^{m^2 \times m^2}$:

$$\begin{aligned} Q_{\mathbf{xxxx}} = & E\left\{\left(\mathbf{g}(\mathbf{x}) - E\{\mathbf{g}(\mathbf{x})\}\right)\left(\mathbf{g}(\mathbf{x}) - E\{\mathbf{g}(\mathbf{x})\}\right)^T\right\} - \\ & - E\{G(\mathbf{xx}^T)\}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \in \mathbf{x} \otimes \mathbf{x}$ – векторная функция; $\otimes$ – символ кронекеровского произведения; $G(R) = R \otimes R + (\mathbf{1}^T \otimes R) \odot (R \otimes \mathbf{1}^T)$ – матрич-

ная функция; $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – квадратная матрица; $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ – единичный вектор; $\odot$ – символ попарного кронекеровского произведения столбцов матрицы слева и матрицы справа, имеющих одинаковое число столбцов.

Кронекеровское произведение матрицы $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ и матрицы $B \in \mathbb{R}^{M \times N}$ определяется выражением

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1m}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}B & \cdots & a_{nm}B \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{mM \times nN}.$$

Операция для определения составной матрицы из попарных кронекеровских произведений столбцов матрицы $A = [\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_m] \in \mathbb{R}^{M \times m}$ и столбцов матрицы $B = [\mathbf{b}_1 \dots \mathbf{b}_m] \in \mathbb{R}^{N \times m}$ определяется следующим выражением:

$$A \odot B = [\mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{b}_1 \dots \mathbf{a}_m \otimes \mathbf{b}_m] \in \mathbb{R}^{MN \times m}.$$

Квадроквариационная матрица $Q_{\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}}$ является матрицей неполного ранга m и представляется с помощью собственных векторов $\{\mathbf{m}_p \in \mathbb{R}^{m^2 \times 1}\}_{p=1}^m$ и собственных значений $\{k_p\}_{p=1}^m$:

$$Q_{\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}} = \sum_{p=1}^m k_p \mathbf{m}_p \mathbf{m}_p^T.$$

Собственный вектор $\mathbf{m}_p$ является векторным представлением собственной матрицы тензора $M_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$ кумулянта четвертого порядка:

$$(\mathbf{m}_p)_{(i-1)m+j} = (M_p)_{ij}.$$

Тензор кумулянта четвертого порядка представляется в виде собственной матрицы $\{M_p \in \mathbb{R}^{m \times m}\}_{p=1}^m$ и собственных значений $\{k_p\}_{p=1}^m$ в соответствии с выражением

$$Q_{\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}} = \sum_{p=1}^m k_p \mathfrak{J} \times_1 M_p \times_2 M_p,$$

где $\mathfrak{J} \in \mathbb{R}^{m \times m \times m \times m}$ – единичный тензор, элементы которого определяются элементами единичной матрицы $I \in \mathbb{R}^{m^2 \times m^2}$ с использованием следующего выражения:

$$(\mathfrak{J})_{ijkl} = (I)_{(i-1)m+j, (k-1)m+l}.$$

Если координаты вектора являются независимыми случайными величинами, то совместная плотность вероятности определяется произведением маргинальных плотностей вероятностей:

$$f_{x_1, x_2, \dots, x_m}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m) = \prod_{p=1}^m f_{x_p}(\xi_p).$$

Корреляционная матрица $R_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$ случайного вектора $\mathbf{x}$ с нулевым средним и независимыми координатами имеет диагональный вид и ее элементы определяются выражением

$$(R_{\mathbf{x}\mathbf{x}})_{ij} = \begin{cases} E\{x_i^2\}, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Элементы соответствующего тензора $Q_{\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}}$ кумулянта четвертого порядка для того же вектора $\mathbf{x}$ определяются выражением

$$(Q_{\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}\mathbf{x}})_{ijkl} = \begin{cases} E\{x_i^4\} - 3E\{x_i^2\}^2, & i = j = k = l \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Дискретный по времени случайный процесс $s(n)$, отсчеты которого имеют независимое и одинаковое распределение вероятностей, является стационарным в строгом смысле случайным процессом [16]. Для вектора наблюдения $\mathbf{s}(n)$ плотность вероятности не зависит от времени и является инвариантной к сдвигу k по времени:

$$f_{\mathbf{s}(n+k)}(\xi; n+k) = f_{\mathbf{s}(n)}(\xi; n) = f_{\mathbf{s}(n)}(\xi),$$

где $s_i(n) = s(n+i-1)$ – i -я координата вектора наблюдения $\mathbf{s}(n)$, полученная сдвигом по времени стационарного в строгом смысле процесса $s(n)$, которая описывается плотностью вероятности, совпадающей с плотностью вероятности j -й компоненты вектора наблюдения $\mathbf{s}(n)$:

$$f_{s_i(n)}(\xi) = f_{s_j(n)}(\xi).$$

Многомерная плотность вероятности стационарного в строгом смысле процесса $s(n)$ является произведением m одинаковых одномерных плотностей вероятностей:

$$f_{s_1(n), \dots, s_m(n)}(\xi_1, \dots, \xi_m) = \prod_{i=1}^m f_{s_i(n)}(\xi_i).$$

Стационарный в строгом смысле случайный процесс используется в качестве простейшей модели наблюдения информационных символов или шума. Для телекоммуникационных сигналов часто используется модель циклоstationарного процесса [7]. Дискретный циклоstationарный случайный процесс $x(n)$ образуется из стационарного в строгом смысле случайного процесса $s(n)$ с использованием следующего выражения:

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(m)\theta(n-mM),$$

где функция $\theta(n)$ определяется элементами произвольного детерминированного вектора $\theta \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ следующим образом:

$$\theta(n) = \sum_{i=1}^M (\theta)_i \delta(n-i+1),$$

$\delta(n)$ – дельта-функция Кронекера.

Для M -мерного вектора наблюдения $\mathbf{x}(n)$ плотность вероятности является периодической функцией времени с циклическим периодом M :

$$f_{\mathbf{x}(n)}(\xi; n) = f_{\mathbf{x}(n+kM)}(\xi; n+kM),$$

где $x_i(n) = x(n+i-1)$ – i -я координата вектора наблюдения $\mathbf{x}(n)$, полученная сдвигом случайного процесса $x(n)$ по времени.

Дискретный случайный процесс $y_i(n)$, образованный из циклоstationарного случайного процесса $x(n)$ с циклическим периодом M согласно выражению

$$y_i(n) = x(nM+i-1) = \theta_i s(n),$$

является стационарным процессом. Для M -мерного вектора наблюдения, составленного из

совокупности процессов $\{y_i(n)\}_{i=1}^M$ согласно выражению

$$\mathbf{y}(n) = [y_1(n) \dots y_M(n)]^T = \theta \mathbf{s}(n) \in \mathbb{R}^{M \times 1},$$

плотность вероятности не зависит от времени и является инвариантной к сдвигу по времени

$$f_{\mathbf{y}(n+k)}(\xi; n+k) = f_{\mathbf{y}(n)}(\xi; n) = f_{\mathbf{y}(n)}(\xi),$$

что соответствует стационарному процессу.

Разделение сигналов и методы слепой идентификации. Модель вектора наблюдения $\mathbf{y}(n)$ (1) может быть представлена с использованием матрицы смешивания $A = [\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_m] \in \mathbb{R}^{M \times m}$, вектора независимых компонент $\mathbf{s}(n) = [s_1(n) \dots s_m(n)]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ и вектора шумов наблюдения $\mathbf{w}(n) \in \mathbb{R}^{M \times 1}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(n) &= A\mathbf{s}(n) + \mathbf{w}(n) = \\ &= \sum_{p=1}^m \mathbf{a}_p s_p(n) + \mathbf{w}(n) = \sum_{p=1}^m \mathbf{x}_p(n) + \mathbf{w}(n), \end{aligned}$$

где ij -й элемент матрицы смешивания определяется значением j -го парциального импульса для i -го сдвига $a_j(\tau_i)$:

$$(A)_{ij} = a_j(\tau_i),$$

$\mathbf{x}_p(n) = \mathbf{a}_p s_p(n) \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ – вектор для сигнала p -го независимого источника.

Вектор наблюдения $\mathbf{y}(n)$ является стационарным случайным вектором, поскольку случайный вектор независимых источников $\mathbf{s}(n)$ и случайный вектор шумов наблюдения $\mathbf{w}(n)$ предполагаются стационарными. Координаты векторов $\mathbf{s}(n)$ и $\mathbf{w}(n)$ предполагаются несмещенными, поэтому векторы математических ожиданий являются нулевыми:

$$\begin{aligned} \mu_{\mathbf{s}} &= 0 \in \mathbb{R}^{m \times 1}; \mu_{\mathbf{w}} = 0 \in \mathbb{R}^{M \times 1}; \\ \mu_{\mathbf{y}} &= A\mu_{\mathbf{s}} + \mu_{\mathbf{w}} = 0 \in \mathbb{R}^{M \times 1}. \end{aligned}$$

Корреляционная матрица вектора наблюдения $\mathbf{y}(n)$ имеет вид

$$R_{yy} = AR_{ss}A^T + \sigma_w^2 I,$$

где R_{ss} – корреляционная матрица независимых символов; σ_w^2 – мощность шумов наблюдения.

Оценка вектора независимых компонент по методу наименьших квадратов может быть получена с использованием выражения

$$\hat{s}(n) = A^+ y(n),$$

где $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$ – псевдообратная матрица Мура–Пенроуза, являющаяся матрицей разделения независимых компонент.

Оценка вектора для сигнала p -го независимого источника может быть получена с использованием выражения

$$\hat{\mathbf{x}}_p(n) = \mathbf{a}_p \hat{s}_p(n).$$

Таким образом, для разделения сигналов требуется знание матрицы смешивания. Если матрица смешивания неизвестна, то для ее определения применяют методы слепой идентификации [10].

Для слепой идентификации на основе статистических характеристик второго порядка используется собственный вектор $\mathbf{v}_p$ и собственное значение λ_p корреляционной матрицы вектора наблюдения, удовлетворяющие выражению

$$R_{yy} \mathbf{v}_p = \lambda_p \mathbf{v}_p.$$

Выражение для определения матрицы смешивания с использованием метода идентификации на основе статистик второго порядка имеет следующий вид:

$$A_{II} = V(\Lambda - \sigma_w^2 I)^{1/2},$$

где $V = [\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_m]$ – матрица собственных векторов; $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ – диагональная матрица собственных значений.

Квадроквариационная матрица гауссовских шумов наблюдения является нулевой матрицей, поскольку для гауссовского распределения кумулянты старше второго порядка равны нулю:

$$Q_{www} = \mathbf{0}.$$

Квадроквариационная матрица вектора наблюдения для случая гауссовских шумов наблюдения

определяется следующим выражением:

$$Q_{yyyy} = (A \otimes A) Q_{ssss} (A \otimes A)^T + Q_{www} = (A \otimes A) Q_{ssss} (A \otimes A)^T,$$

где Q_{ssss} – квадроквариационная матрица независимых источников.

Тензор кумулянта четвертого порядка вектора наблюдения, который соответствует квадроквариационной матрице Q_{yyyy} , определяется следующим образом:

$$Q_{yyyy} = Q_{ssss} \times_1 A \times_2 A \times_3 A \times_4 A,$$

где Q_{ssss} – тензор кумулянта четвертого порядка для независимых источников, соответствующий квадроквариационной матрице Q_{ssss} .

Для слепой идентификации на основе статистических характеристик четвертого порядка используется собственный вектор $\mathbf{m}_p$ и собственное значение k_p квадроквариационной матрицы вектора наблюдения, удовлетворяющие выражению

$$Q_{yyyy} \mathbf{m}_p = k_p \mathbf{m}_p.$$

Альтернативно может использоваться выражение для собственной матрицы $\mathcal{M}_p$ и собственного значения κ_p тензора кумулянта четвертого порядка

$$\langle Q_{yyyy}, \mathcal{M}_p \rangle = \kappa_p \mathcal{M}_p,$$

где k -й элемент скалярного произведения тензора и матрицы определяется выражением

$$(\langle Q_{yyyy}, \mathcal{M}_p \rangle)_{kl} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\mathcal{M}_p)_{ij} (Q_{yyyy})_{ijkl}.$$

Элементы собственной матрицы $\mathcal{M}_p$ и элемента собственного вектора $\mathbf{m}_p$ связаны выражением

$$(\mathcal{M}_p)_{ij} = (\mathbf{m}_p)_{(i-1)M+j}.$$

Собственный вектор Φ_p для матрицы $\mathcal{M}_p$ единичного ранга определяется из уравнения

$$\mathcal{M}_p \Phi_p = \Phi_p.$$

Выражение для определения матрицы смешивания с использованием метода идентификации на основе статистик четвертого порядка имеет следующий вид:

$$A_{IV} = \Phi \left(\Lambda - \sigma_w^2 I \right)^{1/2},$$

где $\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_m] \in \mathbb{R}^{M \times m}$.

Анализ вектора наблюдения $\mathbf{y}(n) \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ методом главных компонент позволяет получить вектор некоррелированных координат меньшей размерности

$$\mathbf{z}(n) = D\mathbf{y}(n) \in \mathbb{R}^{m \times 1},$$

где

$$D = \left(\Lambda - \sigma_w^2 I \right)^{1/2} V^T.$$

Квадроквариационная матрица вектора некоррелированных координат $\mathbf{z}(n)$ определяется выражением

$$Q_{zzzz} = (H \otimes H) Q_{ssss} (H \otimes H)^T$$

и соответствует тензору кумулянта четвертого порядка

$$Q_{zzzz} = Q_{ssss} \times_1 H \times_2 H \times_3 H \times_4 H, \quad H = DA.$$

Для слепой идентификации на основе метода независимых компонент используется собственный вектор $\mathbf{u}_p$ и собственное значение v_p квадроквариационной матрицы вектора $\mathbf{z}(n)$, удовлетворяющие выражению

$$Q_{zzzz} \mathbf{u}_p = v_p \mathbf{u}_p.$$

Альтернативно может использоваться выражение для собственной матрицы U_p и собственного значения v_p тензора кумулянта четвертого порядка:

$$\langle Q_{zzzz}, U_p \rangle = v_p U_p.$$

Элементы собственной матрицы U_p и элемента собственного вектора $\mathbf{u}_p$ связаны выражением

$$(U_p)_{ij} = (\mathbf{u}_p)_{(i-1)m+j}.$$

Собственный вектор Ψ_p матрицы U_p единичного ранга определяется из уравнения

$$U_p \Psi_p = \Psi_p.$$

Выражение для определения матрицы смешивания с использованием методов главных компонент и независимых компонент имеет следующий вид:

$$A_\Lambda = V \left(\Lambda - \sigma_w^2 I \right)^{1/2} \Psi,$$

где $\Psi = [\Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_m] \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

Сравнение описанных подходов разделения сигналов было выполнено с помощью компьютерного моделирования.

Результаты. Сравнение методов слепого разделения сигналов на основе статистик второго и четвертого порядка и метода независимых компонент проводилось на модели сигнала в линии передачи при использовании ортогональных и неортогональных парциальных импульсов. Отсутствие свойства ортогональности парциальных импульсов не позволяет эффективно выполнить разделение сигналов на основе рассмотренных методов, использующих статистики второго и четвертого порядка. В этом случае метод независимых компонент является более эффективным инструментом для разделения сигналов. Эффективность разделения сигналов в линиях связи характеризуется снижением вероятности ошибки на бит или символ информации.

При проведении компьютерного моделирования использовались математические модели форм парциальных импульсов в линии связи для двух независимых источников, формирующих информационный сигнал и перекрестную помеху, согласно выражению

Параметры модели сигналов в линии передачи

Transmission line signal model parameters

Номер модели	Информационный сигнал		Перекрестная помеха	
	A, В	φ, рад	A, В	φ, рад
1	1	0	0.5	π/2
2	1	0	0.5	π/5

$$a(\tau_i) = A \sin(\omega \tau_i / 2 + \varphi).$$

Параметры модели парциальных импульсов приведены в таблице. Количество рассматриваемых в модели независимых источников $m = 2$ является минимальным для разделения сигналов. Это позволяет отобразить на плоскости, заданной двумя координатами независимых источников, результаты разделения сигналов. В модели 1 в качестве ортогональных импульсов использованы квадратурные тригонометрические функции на интервале половины периода. В модели 2 использованы неортогональные формы импульсов.

Таким образом, согласно таблице используют одиночные отклики, формирующие вектор-столбцы модели (1). Размерность $M = 10$ вектор-столбцов соответствует 10 отсчетам парциального импульса. Параметр $\omega = 2\pi / \Delta$ выбран в соответствии с длительностью парциального импульса.

Законы распределения двух независимых источников, формирующих информационный сигнал и перекрестную помеху, описывают одинаково и независимо распределенные последовательности случайных величин. Плотность вероятности равновероятного бинарного ИС задана выражением

$$f_{\text{ИС}}(\alpha) = 0.5 \delta(\alpha + 1) + 0.5 \delta(\alpha - 1).$$

Плотность вероятности символа ПП задана следующим образом:

$$f_{\text{ПП}}(\beta) = 0.25 \delta(\beta + 1) + 0.5 \delta(\beta) + 0.25 \delta(\beta - 1).$$

Совместная плотность вероятности независимых символов ИС и ПП определялась в виде произведения $f_{\text{ИС}}(\alpha)$ и $f_{\text{ПП}}(\beta)$:

$$f_{\text{ИС, ПП}}(\alpha, \beta) = f_{\text{ИС}}(\alpha) f_{\text{ПП}}(\beta).$$

Модель шума представляет собой случайный процесс с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением (σ_w). Значение σ_w определялось для заданного отношения сигнал-шум (ОСШ), равного 10^3 , выражением

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\text{tr}(AR_{\text{ss}}A^T)}{M \cdot \text{ОСШ}}}.$$

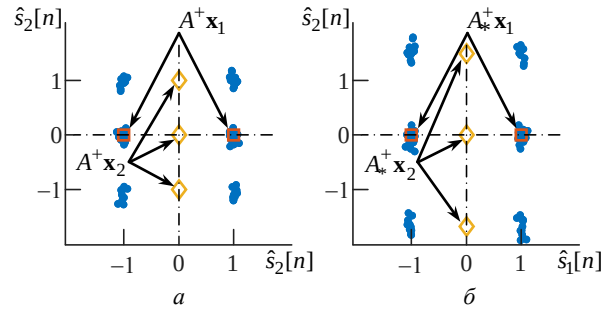


Рис. 4. Оценки независимых компонент, полученные для первой модели разными методами:

$$a - A^+; \bar{b} - A^* = A_{\Pi}^+ = A_{V1}^+ = A_{\Lambda}^+$$

Fig. 4. Estimates of independent components obtained for the first model using different methods:

$$a - A^+; \bar{b} - A^* = A_{\Pi}^+ = A_{V1}^+ = A_{\Lambda}^+$$

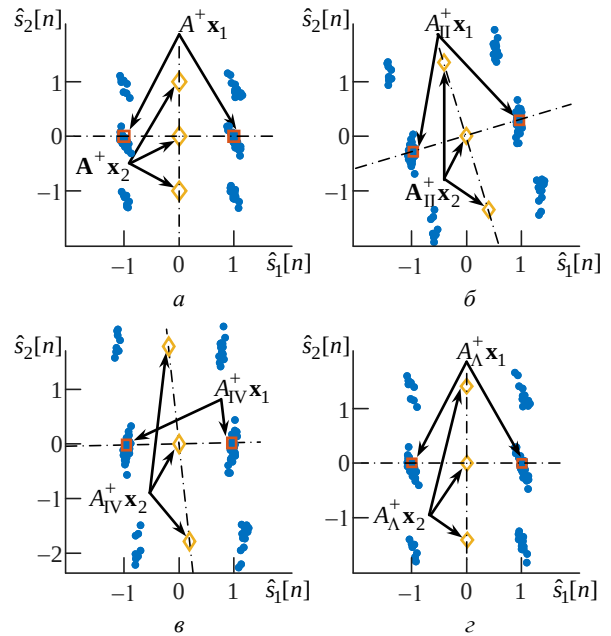


Рис. 5. Оценки независимых компонент, полученные для второй модели разными методами:

$$a - A^+; \bar{b} - A_{\Pi}^+; \bar{v} - A_{V1}^+; \bar{z} - A_{\Lambda}^+$$

Fig. 5. Estimates of independent components obtained for the second model using different methods:

$$a - A^+; \bar{b} - A_{\Pi}^+; \bar{v} - A_{V1}^+; \bar{z} - A_{\Lambda}^+$$

Оценки независимых компонент для моделей 1 и 2, полученные по 100 реализациям случайного вектора для разных методов, приведены на рис. 4 и 5 соответственно. На рис. 4, а и 5, а на плоскости независимых компонент красными квадратами отмечены символы информационного сигнала, а оранжевыми ромбами – символы перекрестной помехи. Положения символов на осевых штрихпунктирных линиях не зависят от модели и определяются

законами распределений $f_{ИС}(\alpha)$ и $f_{ПП}(\beta)$. Совместный закон распределения $f_{ИС, ПП}(\alpha, \beta)$ отображается на рисунках диаграммой рассеяния 100 реализаций случайного вектора. Случайные векторы определяются путем решения обратной задачи методом наименьших квадратов при известной матрице смешивания. Как видно из реализаций, ИС могут быть безошибочно определены как проекции на координату $\hat{s}_1$.

Из рис. 4, б видно, что все рассмотренные методы слепого разделения сигналов позволяют эффективно определять символы ИС для модели 1, что демонстрируется осяевыми линиями, расположенными вдоль координат оценки вектора, и диаграммами рассеяния, совпадающими по ориентации и структуре с методом наименьших квадратов. Матрицы разделения для методов слепой идентификации совпадают, что подтверждает верность выбранных нормировок для проведения сравнений.

Из рис. 5 видно, что для модели 2 матрицы разделения для всех слепых методов получились различными. Из рис. 5, б видно, что осяевые линии для матрицы разделения A_{II}^+ , т. е. при использовании статистик второго порядка, расположены перпендикулярно, но определяют повернутую в плоскости систему координат. Поворот системы координат приводит к увеличению рассеяния проекций на координату $\hat{s}_1$, что приводит к увеличению вероятности ошибок на бит информации.

Из рис. 5, в видно, что осяевые линии для матрицы разделения A_{IV}^+ , т. е. при использовании статистик четвертого порядка, расположены неперпендикулярно. При этом рассеяние проекций на координату $\hat{s}_1$ меньше, чем для статистик второго порядка.

Из рис. 5, г видно, что наилучший результат слепого разделения сигналов для модели 2 позволяет получить метод независимых компонент, для которого осяевые линии расположены вдоль координат оценки вектора независимых компонент, и диаграмма рассеяния совпадает по ориентации и структуре с методом наименьших квадратов.

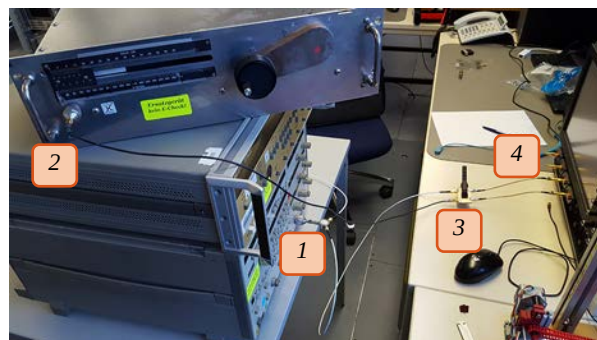


Рис. 6. Фотография измерительного стенда
 Fig. 6. Photo of the measurement setup

Экспериментальные исследования проводились на измерительном стенде, фотография которого приведена на рис. 6 [17]. Две одинаковые и симметричные печатные платы (см. рис. 6, 3), расположенные друг относительно друга на расстоянии $h = 1$ мм, использовались для формирования интенсивных перекрестных помех в зигзагообразных микрополосковых линиях. В качестве источника сигнала в линиях передачи был использован генератор псевдослучайной последовательности импульсов (рис. 6, 1), к выходу которого подключался разветвитель сигналов. Один из выходных сигналов разветвителя поступал непосредственно на вход нижней печатной платы, а другой сигнал подавался на вход верхней печатной платы через линию задержки (рис. 6, 2). Выходы печатных плат подключались к двум каналам цифрового осциллографа (рис. 6, 4). Схема подключения печатных плат показана на рис. 7.

Генератор импульсов Anritsu MP1604B был настроен для формирования периодической псевдослучайной последовательности импульсов с числом импульсов в периоде $2^{10}-1 = 1023$. Частота следования импульсов составляла 1 ГГц. Величина задержки была установлена таким образом,

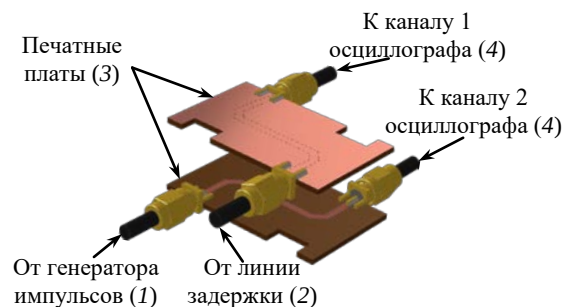


Рис. 7. Схема подключения печатных плат
 Fig. 7. PCB connection diagram

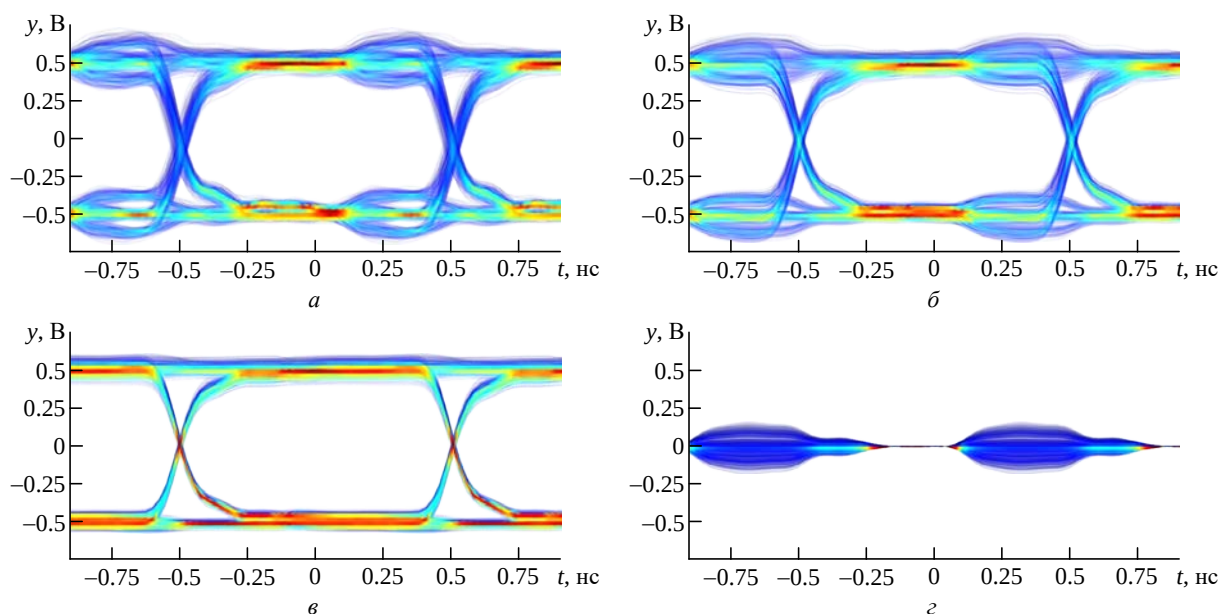


Рис. 8. Глазковые диаграммы сигналов и наводки в канале 1: a – измеренный сигнал; b – проекции; v – информационный сигнал; z – наводка

Fig. 8. Eye diagrams of signals and interference in channel 1: a – measured signal; b – projections; v – informative signal; z – crosstalk

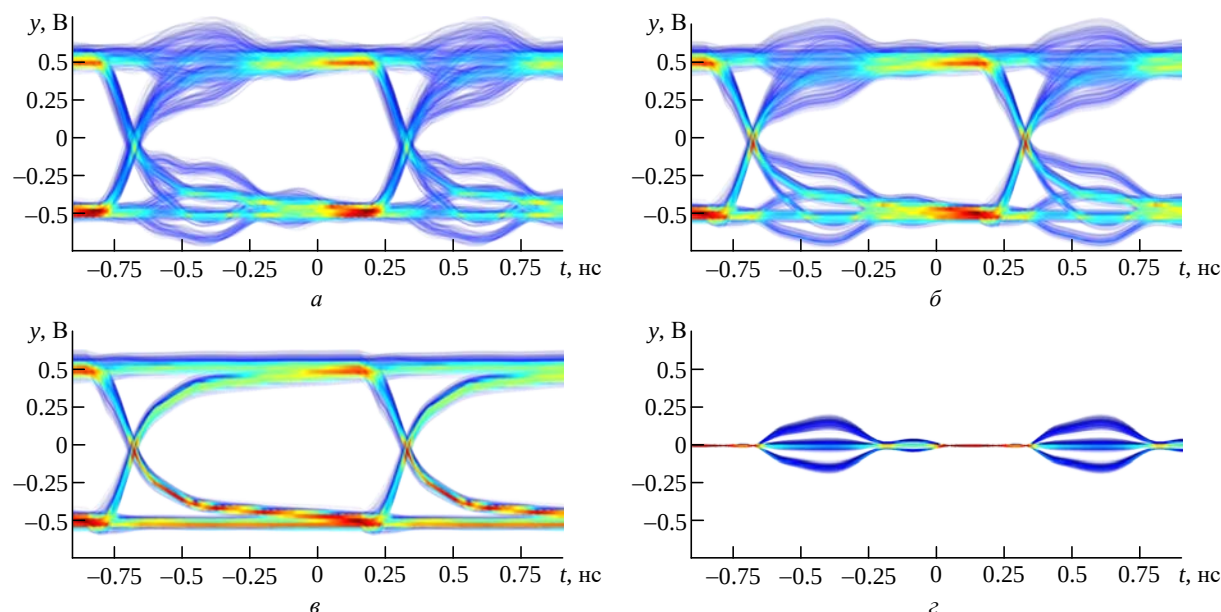


Рис. 9. Глазковые диаграммы сигналов и наводки в канале 2: a – измеренный сигнал; b – проекции; v – информационный сигнал; z – наводка

Fig. 9. Eye diagrams of signals and interference in channel 2: a – measured signal; b – projections; v – informative signal; z – crosstalk

чтобы обеспечить независимость псевдослучайных сигналов в линиях передачи на интервале наблюдения. Частота дискретизации многоканального анализатора сигналов (осциллографа) LeCroy SDA 813Zi-A составляла 40 ГГц.

Результаты экспериментальных исследований для сигналов, зарегистрированных в первом и втором каналах осциллографа, приведе-

ны на рис. 8 и 9 соответственно. Глазковые диаграммы исходных измеренных сигналов в первом и втором каналах осциллографа показаны на рис. 8, a и 9, a соответственно. Проекции в трехмерное пространство главных компонент для двух каналов показаны на рис. 8, b и 9, b . Проекции, полученные за счет сокращения пространства сигнала, представляют собой ре-

Разделение циклостационарных сигналов и наводок

в линиях передачи печатных плат методом независимых компонент

Separation of Cyclostationary Signals and Interference in Transmission Lines of Printed Circuit Boards Based on Independent Component Analysis

зультат аппроксимации измеренных данных и выглядят сглаженными копиями измеренных сигналов. В результате разделения проекций методом независимых компонент восстановлены сигналы без наводок в двух каналах (см. рис. 8, в и 9, в). Представленные рисунки демонстрируют эффективное разделение информационного сигнала и наводки, что позволит выполнить анализ характеристик качества передачи данных по микрополосковым линиям связи [18] после обработки (например, ширина и высота открытого глазка сигнала, длительность фронта импульса, величина джиттера и др.) Выделенная помеховая компонента в измеренном сигнале (см. рис. 8, г и 9, г) также может быть использована для оценки характеристик случайных процессов, влияющих на качество передачи данных.

Результат оценки матрицы смешивания в виде парциальных импульсов для трех независимых источников модели (ИС, МСИ и ПП) представлен на рис. 10. Полученные формы детерминированных импульсов необходимы при проектировании устройств тактирования и синхронизации, эквалайзеров и компенсаторов помех [19], снижающих вероятность ошибки при передаче данных по измеренным линиям связи. Задержанный на интервал длительности одного бита парциальный импульс межсим-

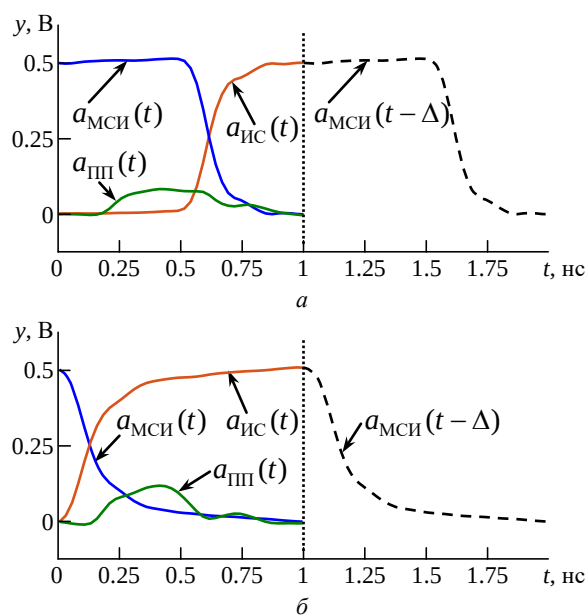


Рис. 10. Восстановленные парциальные импульсы:
 а – канал 1; б – канал 2

Fig. 10. Reconstructed partial pulses:
 а – channel 1; б – channel 2

вольной интерференции образует вместе с парциальным импульсом информационного сигнала общую форму отклика в линии на один бит (рис. 10). На рисунках наблюдаются различия в форме импульсов в двух каналах. Данная информация может быть использована при формировании диапазонов искажений сигналов в микрополосковых линиях связи [20].

Представленные результаты обработки измеренных данных демонстрируют эффективность слепого разделения сигналов при анализе целостности сигналов в проводных линиях связи. Отсутствие необходимости использовать априорные сведения о связи двух одновременно измеряемых сигналов позволяет осуществлять статистическую обработку независимо и параллельно для каждого канала осциллографа или поочередно для каждой линии связи при измерении одноканальным осциллографом. Снижение общего числа синхронных каналов измерения позволяет использовать внешние автоматические коммутирующие устройства при проектировании и тестировании многоканальных проводных линий связи.

Заключение. В статье предложен подход к решению задачи слепой оценки неизвестных характеристик модели наблюдаемого сигнала в микрополосковых линиях передачи с использованием метода независимых компонент. Проведено сравнение методов слепого разделения сигналов на основе статистик второго порядка, кумулянтов четвертого порядка и метода независимых компонент. В методе независимых компонент в качестве первичного этапа статистической обработки для сокращения размерности пространства сигнала и определения некоррелированных координат вектора наблюдения используется метод главных компонент. Метод независимых компонент позволяет выполнить разделение сигналов, основанное на статистической независимости символов источника сигнала в линии передачи и преобразованных символов источника наводки. Результаты проведенного моделирования показали, что для произвольной формы парциальных импульсов метод независимых компонент обеспечивает наилучшее качество восстановления.

В статье представлены результаты обработки экспериментальных данных, измеренных в двух близкорасположенных микрополосковых линиях, при передаче периодической псевдо-

случайной последовательности импульсов с тактовой частотой 1 ГГц. В результате применения метода независимых компонент были получены оценки формы сигналов и парциальных импульсов источников информационных символов и перекрестных помех.

Полученные результаты показали, что предложенная процедура слепой идентифика-

ции обеспечивает разделение сигнала данных и сигнала наводки при условии статистической независимости символов их источников, что позволит повысить качество проектирования и эффективность процесса тестирования высокоскоростных интерфейсов передачи данных в устройствах с высокой степенью интеграции.

Авторский вклад

Кузнецов Юрий Владимирович – постановка задачи; аннотация; введение; проведение экспериментальных исследований; обработка экспериментальных данных; заключение.

Баев Андрей Борисович – описание модели сигнала; проведение экспериментальных исследований; обработка экспериментальных данных; заключение.

Коновалюк Максим Александрович – введение; описание модели сигнала; статистические характеристики случайных величин; методы идентификации; компьютерное моделирование.

Горбунова Анастасия Александровна – статистические характеристики случайных величин; методы идентификации; метод независимых компонент; компьютерное моделирование.

Author's contribution

Yury V. Kuznetsov, problem statement; abstract; introduction; experimental research; analysis of experimental results, conclusion.

Andrey B. Baev, description of the signal model; experimental research; analysis of experimental results; conclusion.

Maxim A. Konovalyuk, introduction; description of the signal model; statistical characteristics of random variables, identification methods, computer modeling.

Anastasia A. Gorbunova, statistical characteristics of random variables; identification methods; independent component analysis; computer modeling.

Список литературы

1. Herres D. Oscilloscopes: A Manual for Students, Engineers, and Scientists. New York: Springer International Publishing, 2020. 267 p. doi: 10.1007/978-3-030-53885-9
2. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1220 p.
3. Pre-FEC and Post-FEC BER as Criteria for Optimizing Wireline Transceivers / M. Yang, S. Shahramian, H. Wong, P. Krotnev, A. C. Carusone // IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, Korea, 22–28 May 2021. IEEE, 2021. doi: 10.1109/iscas51556.2021.9401125
4. Sanders A., Resso M., D'Ambrosia J. Channel Compliance Testing Utilizing Novel Statistical Eye Methodology // Proc. DesignCon, Santa Clara, USA, Feb. 2004. 25 p.
5. Sequence-Coded Multilevel Signaling for High-Speed Interface / C. R. Dick, Aurangozeb, M. Mohammad, M. Hossain // IEEE J. of Solid-State Circuits. 2020. Vol. 55, № 1. P. 27–37. doi: 10.1109/JSSC.2019.2941016
6. Френкс Л., Теория сигналов: пер. с англ. / под ред. Д. Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974. 343 с.
7. Gardner W. A. Cyclostationarity in communication and signal processing. New York: IEEE Press, 1994. 448 p.
8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1966. 728 с.

9. Chrysostomos N. L., Petropulu A. P. Higher-order spectra analysis: a nonlinear signal processing framework. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. 537 p.
10. Zarzoso V., Nandi A. K. Blind Source Separation. Blind Estimation Using Higher-Order Statistics. Boston: Springer, 1999. P. 167–252. doi: 10.1007/978-1-4757-2985-6_4
11. Qureshi S. U. H. Adaptive equalization // Proc. of the IEEE. 1985. Vol. 73, № 9. P. 1349–1387. doi: 10.1109/proc.1985.13298
12. Anderson J. B., Rusek F., Owall V. Faster-Than-Nyquist Signaling // Proc. of the IEEE. 2013. Vol. 101, № 8. P. 1817–1830. doi: 10.1109/JPROC.2012.2233451
13. Lathi B. P., Ding Zhi. Modern Digital and Analog Communication Systems. 4th ed. Oxford: Oxford University Press, 2009. 1004 p.
14. Meyr H. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation and Signal Processing. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997. 864 p. doi: 10.1002/0471200573
15. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. Independent component analysis. London: Wiley Interscience, 2001. 504 p. doi: 10.1002/0471221317
16. Kay S. M. Intuitive Probability and Random Processes Using MATLAB. New York: Springer, 2006. 834 p. doi: 10.1007/b104645

17. Independent Component Analysis of the Cyclostationary Signals in the Transmission Line / Yu. V. Kuznetsov, A. B. Baev, M. A. Konovalyuk, A. A. Gorbunova, J. A. Russer // Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Gothenburg, Sweden, 05–08 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 96–101. doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901014

18. Blind Separation of the Measured Mixed Cyclostationary Waveforms in Transmission Lines of the PCB / Yu. V. Kuznetsov, A. B. Baev, M. A. Konovalyuk, A. A. Gorbunova // Electronics. 2023. Vol. 12, № 15. P. 3272. doi: 10.3390/electronics12153272

19. Cyclostationary Crosstalk Cancellation in High-Speed Transmission Lines / Yu. V. Kuznetsov, A. B. Baev, M. A. Konovalyuk, A. A. Gorbunova // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 17. P. 7988. doi: 10.3390/app11177988

20. Формирование вероятностной модели циклоstationарных сигналов в линиях передачи электронных устройств / М. А. Коновалюк, А. Б. Баев, А. А. Горбунова, Ю. В. Кузнецов // Электросвязь. 2020. № 12. С. 64–71. doi: 10.34832/elsv.2020.13.12.010

Информация об авторах

Кузнецов Юрий Владимирович – доктор технических наук (2005), профессор (2007), заведующий кафедрой теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2012). Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (2020). Автор 233 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая радиотехника; электромагнитная совместимость; информационная безопасность.

Адрес: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, ГСП-3, Москва, 125993, Россия

E-mail: kuznetsovyv@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1194-3445>

Баев Андрей Борисович – кандидат технических наук (2002), доцент (2007), доцент кафедры теоретической радиотехники (405), начальник научно-исследовательского отдела кафедры 405 Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Автор 172 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; статистическая радиотехника; электромагнитная совместимость.

Адрес: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, ГСП-3, Москва, 125993, Россия

E-mail: baev@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3829-1379>

Коновалюк Максим Александрович – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Автор 85 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; статистическая радиотехника; электромагнитная совместимость.

Адрес: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, ГСП-3, Москва, 125993, Россия

E-mail: konovalyukma@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5673-1580>

Горбунова Анастасия Александровна – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Автор 74 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; статистическая радиотехника; электромагнитная совместимость.

Адрес: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, ГСП-3, Москва, 125993, Россия

E-mail: gorbunovaaa@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1300-1718>

References

1. Herres D. Oscilloscopes: A Manual for Students, Engineers, and Scientists. New York, Springer International Publishing, 2020, 267 p. doi: 10.1007/978-3-030-53885-9

2. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge, Cambridge University Press, 2015, 1220 p.

3. Yang M., Shahramian S., Wong H., Krotnev P., Carusone A. C. Pre-FEC and Post-FEC BER as Criteria for Optimizing Wireline Transceivers. IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, Korea, 22–28 May 2021. IEEE, 2021. doi: 10.1109/iscas51556.2021.9401125

4. Sanders A., Resso M., D’Ambrosia J. Channel Compliance Testing Utilizing Novel Statistical Eye Methodology. Proc. DesignCon, Santa Clara, USA, Feb. 2004, 25 p.

5. Aurangozeb, Dick C. R., Mohammad M., Hossain M. Sequence-Coded Multilevel Signaling for High-Speed Interface. IEEE J. of Solid-State Circuits. 2020, vol. 55, no. 1, pp. 27–37. doi: 10.1109/JSSC.2019.2941016

6. Franks L. E. Signal Theory. New Jersey, Prentice-Hall, 1969, 317 p.

7. Gardner W. A. Cyclostationarity in Communication and Signal Processing. New York, IEEE Press, 1994, 448 p.
8. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radio-tehniki* [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering]. Moscow, Sov. radio, 1966, 728 p. (In Russ.)
9. Chrysostomos N. L., Petropulu A. P. Higher-Order Spectra Analysis: A Nonlinear Signal Processing Framework. New Jersey, PTR Prentice Hall, 1993, 537 p.
10. Zarzoso V., Nandi A. K. Blind Source Separation. Blind Estimation Using Higher-Order Statistics. Boston, Springer, 1999, pp. 167–252. doi: 10.1007/978-1-4757-2985-6_4
11. Qureshi S. U. H. Adaptive Equalization. Proc. of the IEEE. 1985, vol. 73, no. 9, pp. 1349–1387. doi: 10.1109/proc.1985.13298
12. Anderson J. B., Rusek F., Owall V. Faster-Than-Nyquist Signaling. Proc. of the IEEE. 2013, vol. 101, no. 8, pp. 1817–1830. doi: 10.1109/JPROC.2012.2233451
13. Lathi B. P., Ding Zhi. Modern Digital and Analog Communication Systems. 4th ed. Oxford, Oxford University Press, 2009, 1004 p.
14. Meyr H. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation and Signal Processing. New York, John Wiley & Sons Inc, 1997, 864 p. doi: 10.1002/0471200573
15. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. Independent Component Analysis. London, Wiley Interscience, 2001, 504 p. doi: 10.1002/0471221317
16. Kay S. M. Intuitive Probability and Random Processes Using MATLAB. New York, Springer, 2006, 834 p. doi: 10.1007/b104645
17. Kuznetsov Yu. V., Baev A. B., Konovalyuk M. A., Gorbunova A. A., Russer J. A. Independent Component Analysis of the Cyclostationary Signals in the Transmission Line. Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Gothenburg, Sweden, 05–08 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 96–101. doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901014
18. Kuznetsov Yu. V., Baev A. B., Konovalyuk M. A., Gorbunova A. A. Blind Separation of the Measured Mixed Cyclostationary Waveforms in Transmission Lines of the PCB. Electronics. 2023, vol. 12, no. 15, p. 3272. doi: 10.3390/electronics12153272
19. Kuznetsov Yu. V., Baev A. B., Konovalyuk M. A., Gorbunova A. A. Cyclostationary Crosstalk Cancellation in High-Speed Transmission Lines. Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 17, p. 7988. doi: 10.3390/app11177988
20. Konovalyuk M. A., Baev A. B., Gorbunova A. A., Kuznetsov Yu. V. Generation of a Probabilistic Model of Cyclostationary Signals in Transmission Lines of Electronic Devices. *Electrosvyaz*. 2020, no. 12, pp. 64–71. doi: 10.34832/elsv.2020.13.12.010. (In Russ.)

Information about the authors

Yury V. Kuznetsov, Dr Sci. (Eng.) (2005), Professor (2007), Head of the Department of Theoretical Radio Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2012). Honored Worker of Higher School of the Russian Federation (2020). The author of 233 scientific publications. Area of expertise: statistical radio engineering; electromagnetic compatibility; information security. Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Highway, GSP-3, Moscow 125993, Russia
E-mail: kuznetsovyv@mai.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1194-3445>

Andrey B. Baev, Cand. Sci. (Eng.) (2002), Associate Professor (2007), Associate Professor and a head of R&D Department on the Theoretical Radio Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of 172 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; statistical radio engineering; electromagnetic compatibility. Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Highway, GSP-3, Moscow 125993, Russia
E-mail: baev@mai.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3829-1379>

Maxim A. Konovalyuk, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Theoretical Radio Engineering Department of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of 85 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; statistical radio engineering; electromagnetic compatibility. Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Highway, GSP-3, Moscow 125993, Russia
E-mail: konovalyukma@mai.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5673-1580>

Anastasia A. Gorbunova, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Associate Professor of the Theoretical Radio Engineering Department of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of 74 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; statistical radio engineering; electromagnetic compatibility. Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Highway, GSP-3, Moscow 125993, Russia
E-mail: gorbunovaaa@mai.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1300-1718>

Автоматический захват и сопровождение объектов интереса в видеоданных с глобальным движением

Н. А. Обухова[✉], А. А. Мотыко, А. А. Чиркунова, А. А. Поздеев, Е. А. Литвинов

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

[✉] natalia172419@yandex.ru

Аннотация

Введение. Автоматический захват и сопровождение движущихся объектов в видеоданных, получаемых видеокамерой, установленной на подвижном носителе, является сегодня одной из самых востребованных задач. К факторам, затрудняющим ее успешное решение, относятся сложная фоновая обстановка, наличие ситуаций перекрытия объектов фоном и друг другом, существенное и быстрое изменение размеров объекта интереса, существенно нелинейная траектория с резкими изменениями направления движения подвижного носителя, на котором установлен сенсор.

Цель работы. Разработать метод автоматического захвата и сопровождения движущихся объектов в видеоданных, полученных в сложных условиях наблюдения. Дополнительным требованием к методу на этапе сопровождения является ограничение на вычислительные ресурсы.

Материалы и методы. Автоматический захват основан на сверточной нейронной сети с архитектурой YOLOv8. Сопровождение объектов реализовано без нейросетевых решений. Для обеспечения устойчивого сопровождения использованы одновременно несколько детекторов с последующим анализом получаемых ими данных. Применен детектор на основе гистограмм ориентированных градиентов (HOG), дополненный детектором на основе корреляционной фильтрации и предсказанием траектории движения на основе фильтра Калмана.

Результаты. На этапе автоматического захвата значение оценки вероятности правильного обнаружения TPR равно 0.81, оценка вероятности ложной тревоги параметра FPR соответствует 0.10. На этапе сопровождения интенсивность отказов (срывов сопровождения) $6 \cdot 10^{-5}$.

Заключение. Предложенный метод позволяет обнаруживать и успешно сопровождать объекты на расстоянии 1500 м при размере проекции объекта на плоскость кадра 5×5 пикселей в условиях глобального движения, сложного фона и существенной динамики свойств объекта интереса.

Ключевые слова: автоматический захват, сопровождение объектов интереса, глобальное движение, фильтр Калмана, гистограмма ориентированных градиентов, корреляционное сопровождение

Для цитирования: Автоматический захват и сопровождение объектов интереса в видеоданных с глобальным движением / Н. А. Обухова, А. А. Мотыко, А. А. Чиркунова, А. А. Поздеев, Е. А. Литвинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 24–40. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-24-40

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме "Мультимодальный комплекс контроля воздушного пространства аэропорта" (Соглашение о предоставлении субсидии федерального бюджета на развитие кооперации государственного научного учреждения и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2023-007 от 10.02.2023 г.) и в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218. Работа выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ").

Статья поступила в редакцию 12.09.2024; принята к публикации после рецензирования 18.10.2024; опубликована онлайн 29.11.2024

Automatic Detection and Tracking of Objects of Interest in Video Data with Global Motion

Natalia A. Obukhova[✉], Alexander A. Motyko,
Anastasia A. Chirkunova, Alexander A. Pozdeev, Elisey A. Litvinov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ natalia172419@yandex.ru

Abstract

Introduction. At present, automatic capture and tracking of moving objects in video data obtained by a video camera mounted on a mobile carrier represents a relevant research task. Its successful solution is challenged by such factors, as a non-uniform background, object overlapping between one another and the background, significant and rapid changes in the size of the object of interest, abrupt changes in the movement trajectory of the mobile carrier.

Aim. To develop an automatic method for detecting moving objects followed by their tracking in video data obtained under difficult observation conditions. An additional requirement imposed on the tracking stage consists in the restriction of computing resources.

Materials and methods. The method is based on a convolutional neural network with a YOLO architecture. Due to the restriction of computing resources, object tracking is implemented without neural network solutions. In order to ensure stable tracking, several detectors are used simultaneously with the subsequent analysis of the data obtained. The tracking stage involves a detector based on histograms of oriented gradients (HOG), supplemented by a detector based on correlation filtering and motion trajectory prediction based on the Kalman filter.

Results. At the automatic detection stage, the TPR, averaged over all video files participating in the experiments, was equal to 0.81, with the FPR corresponding to 0.10. At the tracking stage, the failure rate (tracking failures) was $6 \cdot 10^{-5}$.

Conclusion. The proposed method can be successfully used to detect and track objects at a distance of 1500 m with an object projection size on the frame of 5×5 pixels under the conditions of global motion, a non-uniform background, and significant changes in the properties of the object of interest.

Keywords: automatic detection, objects of interest tracking, global motion, Kalman filter, histogram of oriented gradients, correlation tracking

For citation: Obukhova N. A., Motyko A. A., Chirkunova A. A., Pozdeev A. A., Litvinov E. A. Automatic Detection and Tracking of Objects of Interest in Video Data with Global Motion. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 24–40. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-24-40

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

Source of funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of a comprehensive project to create high-tech production on the topic "Multimodal complex for airport airspace control" (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for the development of cooperation between a state scientific institution and organization of the real sector of the economy in order to implement a comprehensive project for the creation of high-tech production № 075-11-2023-007 dated 02.10.2023) and within the framework of the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 № 218. The work was carried out on the basis of the Federal State Autonomous educational institution of higher education "Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU).

Submitted 12.09.2024; accepted 18.10.2024; published online 29.11.2024

Введение. В последние годы телевизионным системам и оптоэлектронным комплексам автоматического захвата и сопровождения движущихся объектов уделяется повышенное внимание. В значительной мере это обусловле-

но появлением высококачественных видеокамер, а также новых аппаратных решений с большой вычислительной мощностью и высоким быстродействием. Новые возможности позволили в реальном масштабе времени реа-

лизовать сложные методы обработки изображений, повысившие тактико-технические характеристики телевизионных систем. В то же время проблема автоматического захвата и сопровождения движущихся объектов в видеоданных остается по-прежнему одной из самых сложных и не полностью решенных.

В данной статье предлагается метод автоматического захвата и сопровождения неточечных объектов интереса в условиях сложной фоновой обстановки, при наличии ситуаций перекрытия объектов фоном и друг другом (окклюзии объектов), а также при пониженной освещенности. Существенными особенностями решаемой задачи являются:

- размещение видеокамеры на подвижном носителе (движение последнего имеет сложную траекторию с резкими изменениями направления);
- существенное и быстрое изменение размеров объекта интереса от 5×5 элементов разложения до 200×200 элементов разложения (при разрешении 1920×1080).

Дополнительным требованием на этапе сопровождения является ограничение на вычислительные ресурсы.

Автоматический захват. Под результатом захвата (обнаружением объекта интереса) будем понимать выделение объекта стробом, центр которого соответствует центру масс пикселей проекции объекта в плоскости кадра. Границы строба представляют собой прямоугольник, описанный вокруг изображения объекта.

Автоматическое обнаружение объектов интереса может быть реализовано методами, основанными на дискриминантных признаках (яркость, цвет, текстура и движение), и методами глубокого обучения.

При обнаружении объектов по яркостному признаку предполагают наличие однородного фона. Обнаружение объектов интереса на сложном фоне вызывает существенные трудности [1, 2].

Текстурный признак и совокупность разработанных на его основе алгоритмов [3–7] позволяют решать задачи автоматического захвата и устойчивого сопровождения на неоднородном фоне, наиболее эффективным представляется метод на основе гистограммы ориентированных градиентов [8].

В телевизионных системах обнаружения и сопровождения информация об объекте представле-

на в виде набора кадров. Это позволяет использовать для обнаружения признак движения, а также проследить динамику свойств объекта интереса.

В видеоряде детектирование движущихся объектов может быть решено путем вычитания статичного фона [9–11]. Методы на основе вычитания фона сегментируют изображение на передний план и фон. Передний план содержит движущиеся объекты, такие как люди, автомобили, в то время как фон содержит статические объекты, такие как дорога, здания, деревья, стоящие автомобили и т. д.

В этом подходе сначала захватывают опорное фоновое изображение, когда объекты интереса отсутствуют в сцене. Движущийся объект обнаруживают путем вычитания текущего кадра изображения из опорного фонового изображения. На практике фон любой сцены постепенно меняется со временем, поэтому опорное фоновое изображение периодически обновляют, чтобы избежать ложного обнаружения объектов. В этом случае критичным становится принятие решения об обновлении фона. Более эффективными являются методы, автоматически обновляющие оценку фона в процессе работы, например на основе фильтра Калмана.

Детектирование объектов на основе признака достаточно часто реализуют на основании абсолютной межкадровой разности ТВ-сигналов – так называемой энергии движения.

Абсолютная межкадровая разность – это скалярная оценка. С ее помощью невозможно разделить изображения объектов, находящихся в непосредственной близости друг к другу, а также разрешить ситуацию их перекрытия (окклюзию объектов). Существенную проблему вызывает присутствие в кадре глобального движения [12].

Альтернативным способом оценки признака движения являются векторы движения [12–14]. После проецирования на плоскость кадра реальное трехмерное движение объектов отображается двумерным движением, которое может быть оценено дискретными смещениями фрагментов изображения – полем оптического потока или полем векторов движения. Наличие информации о направлении и величине смещения позволяет:

- обнаруживать объекты на сложном фоне, находящиеся в непосредственной близости друг к другу;

– разрешать ситуации окклюзии при сопровождении путем выявления объекта, находящегося на переднем плане.

Главной проблемой применения векторов оптического потока является высокая вероятность получения аномальных, не отражающих истинное движение, векторов, которые возникают на слаботекстурированных фрагментах изображения [15, 16].

На современном этапе наилучшие характеристики при решении задач обнаружения демонстрируют методы, основанные на применении сверточных нейронных сетей [17].

Сверточную нейронную сеть можно представить в виде двух последовательно выполняемых блоков: автоматического экстрактора признаков из изображений и решающего блока, который реализует целевой анализ (обнаружение, классификацию, идентификацию и пр.). Иллюстрация для типовой архитектуры сети (на примере YOLOv8) приведена на рис. 1.

С помощью сверток с многочисленными ядрами фильтров выделяются признаки (backbone часть), которые затем подаются в оконечную часть сети, решающую целевую задачу.

Для автоматической оценки параметров фильтров экстрактора признаков и решающего блока (РБ) необходима обучающая выборка.

Она представляет собой размеченные видеоданные, в которых для серии входных изображений заранее известны целевые ответы. Следует отметить, что для обучения современных сверточных нейронных сетей объем обучающей выборки должен быть достаточно большим: обычно решение типовой промышленной задачи требует минимум 50–100 тысяч размеченных изображений.

Среди нейросетевых архитектур, предназначенных для обнаружения на данный момент, выделяются архитектуры типа YOLO (последняя версия – 11, активно используются версии 8–11). Архитектура YOLO обеспечивает наилучший компромисс между точностью обнаружения и скоростью работы [18]. На рис. 2 представлены сравнительные характеристики различных поколений моделей, полученные на аппаратном обеспечении GPU T4, с использованием программного обеспечения TensorRT 10.

Из приведенных положений следует, что наиболее эффективным в рамках решаемой задачи является использование сверточных нейронных сетей, текстурного признака с оценкой на основе гистограммы ориентированных градиентов и признака движения, оцениваемого на основе оптического потока.

Эффективность перечисленных подходов была оценена для реализации автоматического

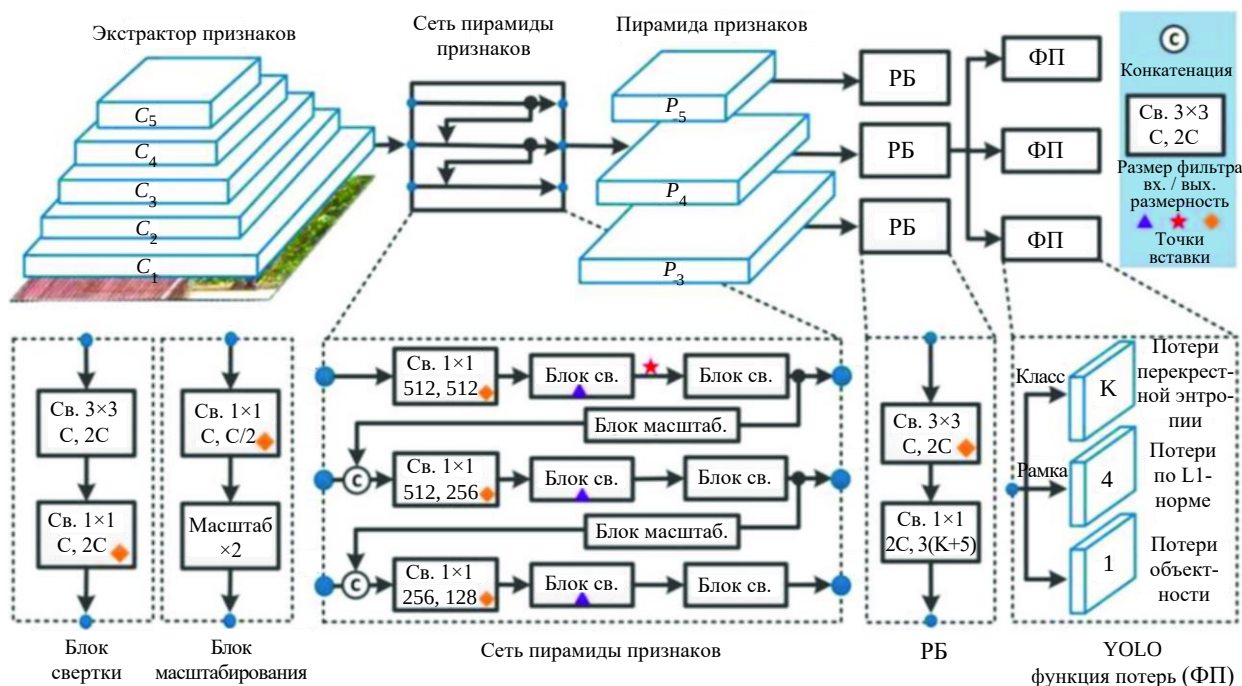


Рис. 1. Общая схема сверточной нейронной сети на примере архитектуры YOLOv8

Fig. 1. General scheme of a convolutional neural network using the YOLOv8 architecture as an example

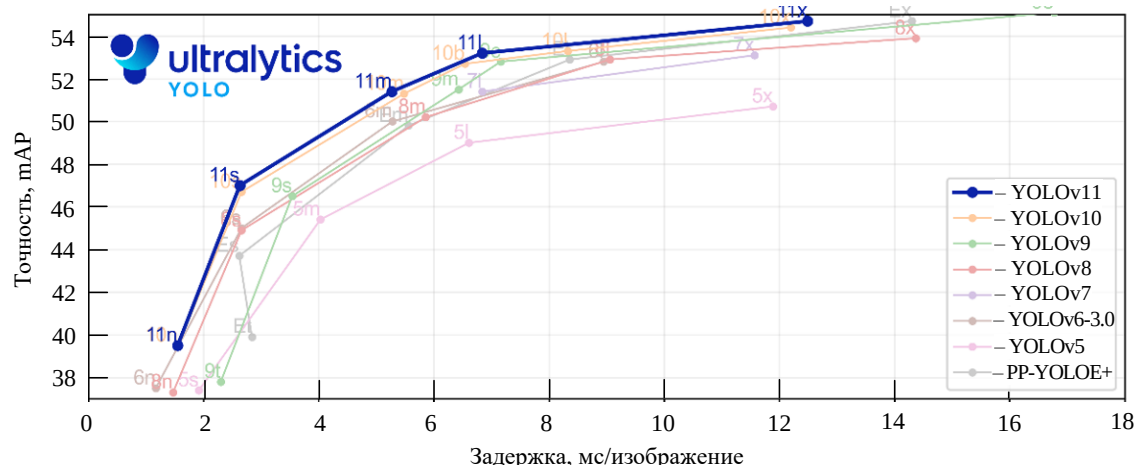


Рис. 2. Характеристики (точность/быстродействие) различных архитектур YOLO

Fig. 2. Characteristics (accuracy/performance) of various YOLO architectures

захвата в рамках решаемой задачи. В анализе не использовались методы, основанные на яркостном признаке, в силу существенной неоднородности фона в решаемой задаче и, соответственно, априорно низкой эффективности их применения. Присутствие выраженного глобального движения, обусловленного резкими маневрами носителя, на котором установлен сенсор, позволяет исключить из рассмотрения методы, основанные на вычитании фона и на энергии движения. Таким образом, сравнительный анализ был выполнен для методов, основанных на текстурном признаке, а именно на гистограмме ориентированных градиентов, векторах оптического потока и сверточных нейронных сетях.

На основе полученных результатов моделирования (оценивалась метрика mAP) для автоматического обнаружения объекта интереса было выбрано нейросетевое решение – архитектура YOLOv8.

Разрешение кадров, получаемых от видеокамеры, соответствует стандарту FHD. Использование изображений большого размера для обучения модели неэффективно: возникает проблема с нехваткой памяти, процедура осуществляется медленно, результирующая модель получается "тяжелой". Масштабирование снимков, традиционно используемое в подобных случаях, невозможно, так как в результате теряются малоразмерные объекты интереса и впоследствии модель не сможет их обнаруживать.

В этой связи модель обнаружения была обучена на снимках стандартного для архитектуры YOLOv8 размера – 320×320 пикселей.

Данные изображения были получены нарезкой исходных снимков на фрагменты. Алгоритм фрагментирования содержал специальную логику для недопущения "разрезания" целевых объектов. Таким образом, фрагменты формировались вокруг имевшихся в обучающей выборке размеченных объектов интереса. Дополнительно для обеспечения сбалансированности выборки подготавливались негативные фрагменты, содержащие фон различного вида при отсутствии объектов интереса.

Исходный набор содержал более 120 000 снимков, включающих данные от сенсоров различного типа. После процедуры декорреляции объем данных тренировочной выборки составил 43 000 снимков, объем валидационной выборки – 10 000.

После фрагментации под размер 320×320 объем тренировочной выборки составил 55 000, объем валидационной выборки – 15 000 снимков.

После автоматизированного анализа выборки и очистки от данных с некорректной или неточной разметкой выход составил 27 000 изображений для тренировки модели и 8000 – для валидации. После добавления негативных примеров итоговый объем составил: 87 000 – для тренировки, 20 000 – для валидации.

В результате оценки точностных параметров модели по валидационным выборкам были получены следующие результаты. Значение F-меры (гармоническое среднее между точностью и полнотой, одна из основных метрик для оценки качества модели) соответствует 0.8. На рис. 3 приведен график, иллюстрирующий зависимость точность–

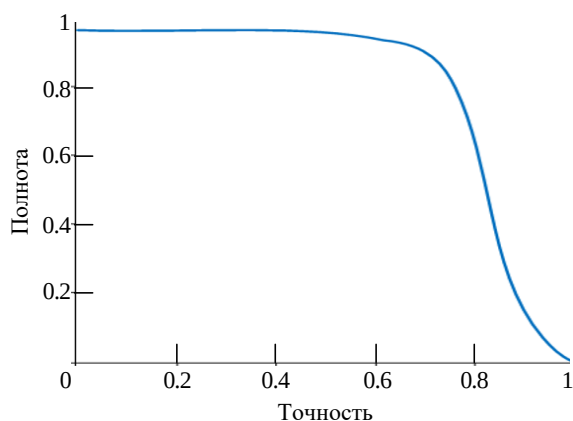


Рис. 3. Кривая зависимости точность–полнота для модели, осуществляющей обнаружение

Fig. 3. The accuracy–completeness dependence curve for the model performing the detection

полнота для модели [19]. Следует отметить, что рассматриваемая модель представляет собой одноклассовый детектор объектов интереса.

Полученные точностные характеристики достаточно высокие с учетом того, что результат детектирования не является "финальным". На основе результатов нейросетевого детектора формируется строб для дальнейшего автоматического сопровождения объекта интереса.

Сопровождение объектов интереса. Основные принципы метода автоматического сопровождения объектов интереса на сложном фоне. Анализ работ в области видеоаналитики позволяет выделить два основных подхода к задаче сопровождения: алгоритмы, построенные на сверточных нейронных сетях, и не нейросетевые "классические" алгоритмы [20]. Алгоритмы, использующие нейронные сети, показывают хорошие результаты, однако их выигрыш по сравнению с аналогами не столь существен, как для задач обнаружения и классификации. При этом сверточные нейронные сети требуют значительных вычислительных ресурсов, что является проблемой при развертывании подобных решений в реальных системах с ресурсными ограничениями. Поэтому для решения сформулированной задачи в рамках ограничений на вычислительную сложность были использованы подходы, не использующие нейронные сети.

Среди таких подходов можно выделить подходы на основе корреляционной фильтрации и гистограмм ориентированных градиентов.

При корреляционной фильтрации сопровождение осуществляется сравнением текущего изображения с эталонным. Эталонное изображение записывается в момент формирования оператором (или алгоритмом автоматического детектирования) строба для объекта интереса и содержит видеoinформацию не только об объекте, но и об окружающем его фоне в пределах строба. Отклонение текущего положения объекта от предшествующего и сигнал ошибки определяют сравнением эталонного и текущего изображений с помощью корреляционной фильтрации (корреляционной решающей функции).

При реализации сопровождения необходимо не только выполнить детектирование объекта, но и построить модель изменения параметров объекта интереса. Данная модель позволяет предсказать изменение параметров объекта во времени, а также выполнить сопровождение "по памяти" в случае окклюзии. Наиболее эффективным инструментом для реализации сопровождения является фильтр Калмана. Широкое применение фильтра Калмана в задачах сопровождения можно объяснить способностью извлечения информации из зашумленных данных. Математически в данной модели реализовано два этапа вычислений. На первом этапе (этап прогнозирования) предсказывают значение положения объекта на основе предыдущих значений. Второй этап (этап корректировки) предполагает уточнение предсказанного значения и оценку ошибки. Уточнение происходит на основе измерения текущих данных об объекте интереса.

Для решаемой задачи в двумерном пространстве вектор состояния системы (объекта интереса) и вектор управления имеют вид

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix},$$

где x, y – координаты центра тяжести объекта интереса; $\dot{x}, \dot{y}$ – скорость объекта интереса; $\ddot{x}, \ddot{y}$ – ускорение объекта интереса.

Уравнения этапа прогнозирования имеют вид

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F_k \mathbf{x}_{k-1|k-1} + B_k \mathbf{u}_k;$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k,$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ – прогнозируемый вектор состояния системы; F_k – матрица состояния системы; B_k – матрица управления; P_k – ковариационная матрица, которая описывает связь между положением объекта и его скоростью; Q_k – ковариационная матрица процесса.

Матрицы состояния системы F_k и управления B_k определены следующим образом:

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_k = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 & 0 \\ 0 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix},$$

где Δt – временной интервал между соседними состояниями системы.

Уравнения на этапе корректировки предсказания имеют вид

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k \tilde{\mathbf{y}}_k;$$

$$P_{k|k} = [1 - K_k H_k] P_{k|k-1};$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1},$$

где K_k – коэффициент усиления Калмана; $\mathbf{z}_k$ – полученное положение объекта интереса в результате детектирования; H – матрица, характеризующая поступление информации с разных датчиков. В рамках решаемой задачи:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Коэффициент усиления Калмана:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1};$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k.$$

Матрицу шума измерений R инициализируют квадратами отклонений по соответствующей координате:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}.$$

Особенностями решаемой задачи являются сложный фон, существенная динамика свойств объекта интереса, глобальное движение в кадре, вызванное размещением видеокамеры на подвижном носителе. Одновременно с этим существуют ограничения на вычислительные ресурсы.

При условии ограничений на вычислительные ресурсы целесообразно отказаться от нейросетевого детектора, а для обеспечения устойчивого сопровождения использовать несколько детекторов одновременно. В качестве базы на этапе сопровождения использован детектор на основе гистограмм ориентированных градиентов (HOG), дополненный детектором на основе корреляционной фильтрации и предсказанием траектории движения на основе фильтра Калмана. Необходимость дополнения детектора на основе HOG корреляционным детектором обусловлена неустойчивой работой HOG-детектора при резкой динамике размеров объекта интереса.

Таким образом, метод сопровождения на каждом кадре имеет три набора данных для анализа: результат корреляционного совмещения, результат выделения на основе гистограмм ориентированных градиентов (HOG-детектора) и предсказанные оценки параметров объекта интереса на основе фильтра Калмана. Каждый набор данных включает в себя положение центра тяжести и размеры объекта интереса.

Сравнение результатов детектирования и предсказания по модели на основе фильтра Калмана проводят в соответствии с мерой Intersection Over Union (IOU):

$$\text{IOU} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

где A и B – прямоугольные области, представляющие собой результат детектирования или предсказания; $|\cdot|$ – мощность соответствующего множества (площадь прямоугольной области); $\cap$, $\cup$ – пересечение и объединение множеств соответственно.

Для обеспечения устойчивого сопровождения в условиях резкого изменения размеров объекта интереса и динамичного маневрирования носителя, на котором установлен видео-

датчик, предложен следующий алгоритм анализа полученных данных.

Если совпадают данные обоих детекторов и оценки, предсказанные фильтром Калмана, то проводится переинициализация корреляционного детектора. Под переинициализацией будем понимать обновление содержания эталонного изображения на основе текущих видеоданных. Если данные, полученные детектором на основе корреляционного совмещения и HOG-детектором, совпадают, но существенно расходятся с оценками, предсказанными фильтром Калмана, то это означает присутствие выраженного глобального движения (резкий маневр носителя) и требует переинициализации параметров фильтра Калмана. Если совпадают данные, полученные с фильтра Калмана и корреляционного детектора, но при этом результаты HOG и корреляционного детекторов имеют расхождение, это означает приближение объекта интереса со значительным увеличением его размеров. В этом случае для предотвращения потери объекта интереса сопровождение реализуют только на основе корреляционного фильтра и проводят переинициализацию HOG-детектора. Переход на корреляционное сопровождение реализуют по пороговому ограничению:

$$\text{area_thr} \cdot S_c > S_{tr},$$

где area_thr – пороговое ограничение; S_c – площадь отклика корреляционного детектора; S_{tr} – площадь отклика HOG-детектора.

Значение area_thr определено из следующих соображений. Высокое значение порога area_thr позволяет повысить качество сопровождения при приближении цели, но существенно снижает устойчивость сопровождения на сложном фоне. В этом случае часто происходит переключение на корреляционный трекер и переинициализация CSRT-трекера. Поэтому величину порога рекомендуется сделать равной 0.6–0.7, чтобы обеспечить баланс между качеством сопровождения при быстром приближении объекта и на сложном фоне.

Условием прекращения сопровождения является отсутствие совпадений наборов данных от детекторов и фильтра Калмана более чем в N кадрах. Для фиксации этой ситуации преду-

смотрен специальный счетчик N_k . Значение счетчика N_k увеличивается, если все три набора данных для анализа (результат работы HOG и корреляционного детекторов, а также фильтра Калмана) не совпадают и сопровождение выполняется на основе фильтра Калмана (сопровождение "по памяти"). Если обнаружено совпадение и для дальнейшего сопровождения возвращен результат одного из детекторов, то счетчик N_k обнуляется.

Структурная схема предложенного алгоритма приведена на рис. 4.

Особенности программной реализации предложенного метода сопровождения. В программном решении предложенного алгоритма для реализации HOG-детектора использован Channel and Spatial Reliability Tracker (CSRT) [8]. Для описания детектируемого объекта в CSRT помимо HOG используются признаки Color Names. HOG отражает информацию о текстуре и форме, а Color Names – о цвете, что помогает использовать более полное представление об объекте. Применение Color Names вместо классического трехкомпонентного описания позволяет добиться большей устойчивости к изменениям в цвете фона или условиям освещения.

Основная идея CSRT лежит в расчете пространственной и канальной надежности. Под каналами в данном случае понимаются каналы признаков HOG и Color Names [21]. Авторы [22] используют несколько HOG-каналов для более точного представления текстурных и контурных особенностей объекта. Разные каналы могут включать разные ориентации градиентов и различные размеры ячеек. Для каждого канала рассчитывается весовой коэффициент, характеризующий его степень надежности для отслеживания объекта.

Карта пространственной надежности отражает "уверенность" в том, что определенные области объекта являются надежными для отслеживания. Эта карта помогает алгоритму фокусироваться на тех областях объекта, которые лучше соответствуют оригинальным признакам, и игнорировать области, которые могут быть искажены или скрыты, а также лучше отслеживать объекты непрямоугольной формы.

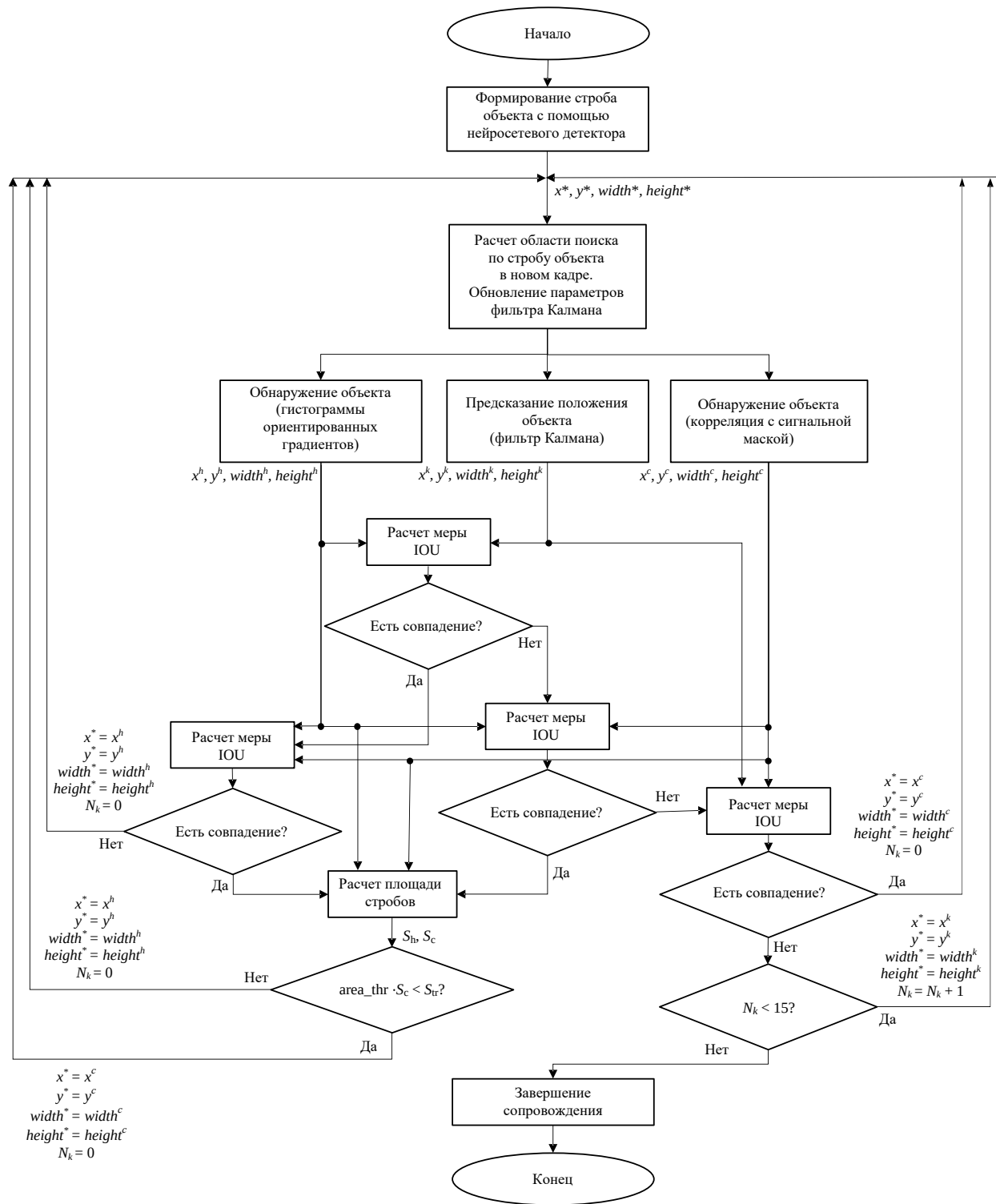


Рис. 4. Структурная схема алгоритма сопровождения

Fig. 4. Block diagram of the tracking algorithm

В качестве корреляционного детектора при реализации предложенного метода был использован KCF (Kernelized Correlation Filters) [23]. Работа KCF организована на применении корреляционных фильтров, которые обучаются на основе примеров объекта в разных положениях и

масштабах. В отличие от классического корреляционного метода KCF обладает высокой вычислительной эффективностью за счет использования свойств циклической матрицы и быстрого преобразования Фурье (FFT) [23]. Одной из ключевых особенностей KCF является использование

"ядерного трюка", который позволяет преобразовывать входные данные в более высокоразмерное пространство, где объекты легче различимы.

Проведенные эксперименты показали, что лучшее качество сопровождения при увеличении размеров цели обеспечивает KCF-трекер, а сопровождение объекта на сложном фоне – CSRT-трекер. Высокая надежность сопровождения объекта на сложном фоне обусловлена встроенным в CSRT-трекер алгоритмом обучения. Такой подход, в свою очередь, приводит к тому, что переинициализация CSRT-трекера снижает точность на нескольких первых кадрах, поэтому данную процедуру следует выполнять только при существенной необходимости.

Для повышения надежности сопровождения после переинициализации CSRT-трекера предлагается следующая процедура. В качестве основного принимается результат корреляционного трекера без переинициализации CSRT-трекера. В случае если результаты KCF и CSRT совпадают при обработке последующих кадров, основным снова становится CSRT-трекер. В противном случае происходит его повторная переинициализация.

Экспериментальное исследование. Основная задача экспериментального исследования метода автоматического захвата – оценить вероятность правильного обнаружения на заданной дальности. Предельная дальность, для которой выполнялась оценка вероятности правильного обнаружения, – 1500 м.

Были подготовлены видеоданные со следующими характеристиками:

- размер объекта интереса $30 \times 30 \times 30$ см;
- площадь объекта интереса от 5×5 до 200×200 пикселей для формата 1920×1080 пикселей при отношении сигнал/шум не менее 40 дБ, яркостном контрасте объекта интереса к фону не менее 15 %;

– метеорологическая дальность видимости не менее 1500 м;

– уровень освещенности не менее 500 лк.

При съемке видеоданных использовалась тестовая камера с разрешением 1920×1080 с переменным фокусным расстоянием и углами поля зрения от 2.3 до 63° . Объект интереса имел размеры $20 \times 18 \times 5.5$ см.

При съемке видеоданных фокусное расстояние объектива камеры изменялось таким образом, чтобы угол поля зрения соответствовал значению из табл. 1. При этом размеры объекта интереса в пикселях на дистанции 100 м соответствуют размерам цели (не менее $30 \times 30 \times 30$ см) на дистанции 1500 м при использовании камеры с узким углом обзора.

Съемка видеоданных для задачи предельной дистанции обнаружения проводится на двух дистанциях согласно табл. 1. Примеры кадров из тестовых видеопоследовательностей представлены на рис. 5.

Для каждого видеофайла выполнялось автоматическое обнаружение объекта интереса в каждом кадре. По результатам анализа кадра записывались следующие результаты: номер кадра и наличие/отсутствие фактов обнаружения. При обнаружении объекта интереса записываются его координаты.

По полученным данным рассчитывается оценка вероятности правильного обнаружения TPR, оценка вероятности ложной тревоги FPR на заданной дальности обнаружения:

$$TPR = TP/QP;$$

$$FPR = FP/Q,$$

где TP – обнаруженные объекты интереса; QP – общее число объектов интереса; FP – число ложных срабатываний детектора; Q – общее число детектированных объектов. Указанные параметры считаются нарастающим итогом для кадров видеоряда.

Табл. 1. Параметры дальности и размеров объекта для экспериментального исследования

Tab. 1. Parameters of the range and size of the object for experimental research

Параметр	Параметры камеры обнаружения	Параметры тестовой камеры в режиме обнаружения
Угол поля зрения, ...°	6	27.5
Дальность № 1, м	1500	100
Размер объекта на дистанции № 1, пикселей	7.3	7.35
Дальность № 2, м	2230	150
Размер объекта на дистанции № 2, пикселей	4.9	4.9



Рис. 5. Примеры кадров из тестовых видеопоследовательностей

Fig. 5. Examples of frames from test video sequences

Полученные результаты приведены в табл. 2. На этапе сопровождения в качестве основной характеристики рассматривалось число срывов сопровождения. Под срывом в данном исследовании будем понимать потерю объекта с последующей необходимостью выполнения

Табл. 2. Данные тестов для оценки вероятности правильного обнаружения на предельной дальности 1500 м

Tab. 2. Test data to assess the probability of correct detection at a maximum range of 1500 m

Видео	Объект	TP	FP	QP	Q	TPR	FPR
1. День, объект на фоне облачного неба	1	1149	20	1151	1169	0.99	0.02
2. Сумерки, объект на фоне облачного неба и леса	1	2506	278	2784	2784	0.90	0.10
3. Сумерки, объект на фоне растительности	1	46	2	74	48	0.62	0.04
4. Сумерки, 2 объекта на динамическом фоне (ветер, листва): объект 1 объект 2	1	49	36	56	85	0.88	0.42
	2	76	9	88	85	0.86	0.11
5. День, объект на низкодетальном фоне, дымка	1	339	6	699	345	0.48	0.02
6. День, 2 объекта на высокодетальном фоне, дымка: объект 1 объект 2	1	1601	114	1722	1715	0.93	0.07
	2	1388	79	1722	1567	0.81	0.05
7. День, объект пересекает линию горизонта (небо и лес)	1	234	21	298	261	0.78	0.08

Табл. 3. Результаты экспериментального исследования

Tab. 3. Experimental results

№ видео	Описание	Число кадров	Число срывов (предложенный алгоритм)	Число срывов (SAM)
1	Объект на простом фоне (небо)	2987	0	0
2	Объект на простом фоне (небо), присутствует кратковременный перелет объекта через линию горизонта на сложный фон	9108	0	0
3	Объект на сложном фоне (лес, дома)	1906	1	1
4	Объект на сложном фоне (лес, поле, дорога)	633	0	0
5	Объект на простом фоне (небо), существенное изменение размеров объекта	1160	0	0
6	Объект на сложном фоне (лес, поле), присутствуют моменты, когда объект сливается с фоном	1237	0	1
7	Объект на сложном фоне (небо, лес, дорога), присутствуют моменты с резким глобальным движением, изменением размеров объекта	1110	4	3
8	Объект на сложном фоне (лес, небо), присутствуют моменты, когда объект сливается с фоном	926	2	1
9	Объект на сложном фоне (лес, поле, дорога), присутствует глобальное движение, значимое изменение размеров объекта, повороты объекта интереса и носителя камеры	702	2	2
10	Объект на простом фоне (небо), низкое значение ОСШ, присутствуют помехи, появление "теней" объектов в результате рассогласования каналов, глобальное движение, существенное изменение размеров объекта	675	4	2

автоматического захвата с нейросетевым детектором. В качестве конкурирующего решения для проведения сравнительного исследования был использован новейший алгоритм на базе технологии глубокого обучения – SAM [24]. Данный нейросетевой алгоритм на сегодняшний день является одним из лидеров по точностным характеристикам и пользуется популярностью у исследователей.

Результаты экспериментального исследования 10 видеороликов приведены в табл. 3. Как видно из описания, на видеороликах присутствуют ситуации, возникающие в реальных усло-

виях и затрудняющие процесс сопровождения.

Примеры кадров с существенным увеличением размеров объекта интереса и кадров с резкой сменой направления движения из-за маневра носителя приведены на рис. 6 и 7.

Полученные данные табл. 3 позволяют рассчитать показатель интенсивности отказов (срывов сопровождения) [25]:

$$F = Ft / N,$$

где Ft – число срывов сопровождения; N – общее число кадров видеоряда.

Соответственно, по данным экспериментов,

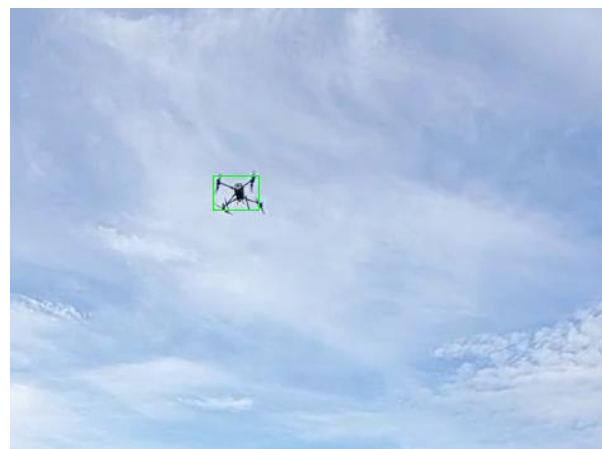
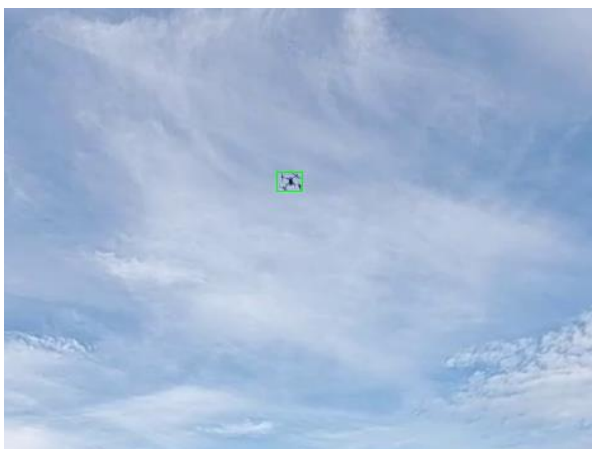


Рис. 6. Пример изменения размеров объекта

Fig. 6. Example of resizing the object



Рис. 7. Пример значительного глобального движения в результате поворота и смены направления носителя

Fig. 7. Example of significant global motion as a result of turning and changing the direction of the carrier

предложенный алгоритм имеет интенсивность отказов $6 \cdot 10^{-4}$. При этом аналогичный параметр у конкурирующего решения (SAM) составил $5 \cdot 10^{-4}$. Как видно по полученным значениям и табл. 3, оба алгоритма демонстрируют близкие результаты. SAM показывает относительно лучшую точность, однако с практической точки зрения характеристики двух алгоритмов (достигнутые значения интенсивности отказов) сопоставимы.

Заключение. Предложенный метод автоматического захвата и сопровождения позволяет обнаруживать объект на дальности 1500 м при размере проекции объекта на плоскость кадра от 5×5 элементов разложения. Усредненное значение по всем видеофайлам серии оценки вероятности правильного обнаружения TPR соответствует значению 0.81, оценка вероятности ложной тревоги параметра FPR соответствует значению 0.10.

Экспериментальное исследование показало, что алгоритм сопровождения демонстрирует хорошие результаты на простом и сложном фоне. Срывы сопровождения в основном возникают в случаях значительных поворотов

объекта интереса при изменении его размеров, на границах перехода с одного фона на другой. Срывы могут происходить при наличии нескольких сложных ситуаций одновременно, которые не критичны по отдельности, например резкое глобальное движение и помеха. Предложенный алгоритм сопровождения обладает сопоставимыми с практической точки зрения точностными характеристиками с передовым современным аналогом, построенным на базе технологий глубокого обучения. При этом предложенный алгоритм существенно проще в развертывании на целевой аппаратуре: не требует графических ускорителей, отличается высоким быстродействием, простотой и гибкостью настройки под специфику и характеристики системы.

Достигнутые результаты обусловлены использованием многопризнаковой детекции с последующей обработкой, позволяющей выявить моменты маневрирования носителя и другие сложные ситуации. К достоинствам предложенного метода также следует отнести низкую вычислительную емкость (нейросетевой детектор присутствует только на этапе автоматического захвата).

Авторский вклад

Обухова Наталия Александровна – разработка метода и алгоритмов автоматического захвата и траекторного сопровождения объектов интереса.

Мотыко Александр Александрович – разработка метода и алгоритмов автоматического захвата и траекторного сопровождения объектов интереса.

Чиркунова Анастасия Анатольевна – разработка метода и алгоритмов автоматического захвата и траекторного сопровождения объектов интереса.

Поздеев Александр Анатольевич – разработка метода и алгоритмов автоматического захвата и траекторного сопровождения объектов интереса.

Литвинов Елисей Александрович – моделирование алгоритмов автоматического захвата и траекторного сопровождения объектов интереса.

Author's contribution

Natalia A. Obukhova, development of a method and algorithms for automatic capture and trajectory tracking of objects of interest.

Alexander A. Motyko, development of a method and algorithms for automatic capture and trajectory tracking of objects of interest.

Anastasia A. Chirkunova, development of a method and algorithms for automatic capture and trajectory tracking of objects of interest.

Alexander A. Pozdeev, development of a method and algorithms for automatic capture and trajectory tracking of objects of interest.

Elisey A. Litvinov, implementation of the algorithms for automatic capture and trajectory tracking of objects of interest.

Список литературы

1. Yu Zhang, Xiangzhi Bai, Tao Wang. Boundary finding based multi-focus image fusion through multi-scale morphological focus-measure // Information Fusion. 2017. Vol. 35. P. 81–101. doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.006
2. Hossain M. D., Chen D. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. Vol. 150. P. 115–134. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009
3. Segmentation of Natural Images by Texture and Boundary Compression / H. Mobahi, S. Rao, A. Yang, S. Sastry, Y. Ma // Intern. J. of Computer Vision. 2011. Vol. 95. P. 86–98.
4. Natural Image Segmentation with Adaptive Texture and Boundary Encoding / S. R. Rao, H. Mobahi, A. Y. Yang, S. S. Sastry, Y. Ma; Ed. by H. Zha, R.-i. Taniguchi, S. Maybank // Computer Vision – ACCV 2009. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2010. Vol. 5994. P. 135–146. doi: 10.1007/978-3-642-12307-8_13
5. Texture image segmentation using fused features and active contour / M. Gao, H. Chen, Sh. Zheng, B. Fang, L. Zhang // 23rd Intern. Conf. on Pattern Recognition, Cancun, Mexico, 04–08 Dec. 2016. IEEE, 2016. P. 520–526. doi: 10.1109/ICPR.2016.7899935
6. Bouaynaya N., Charif-Chefchaoui M., Schonfeld D. Spatially Variant Morphological Restoration and Skeleton Representation // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, iss. 11. P. 3579–3591. doi: 10.1109/TIP.2006.877475
7. Reconfigurable architecture for computing histograms in real-time tailored to FPGA-based smart camera / L. Maggiani, C. Salvadori, M. Petracca, P. Pagano, R. Saletti // IEEE 23rd Intern. Symp. on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 01–04 June 2014. IEEE, 2014. P. 1042–1046. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864756
8. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, USA, 20–25 June 2005. IEEE, 2005. Vol. 1. P. 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177
9. Kumar S., Yadav J. S. Video Object Extraction and its Tracking using Background Subtraction in Complex Environments // Perspectives in Science. 2016. Vol. 8. P. 317–322. doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.064
10. Shaikh S. H., Saeed K., Chaki N. Chapter-2, Moving Object Detection Approaches, Challenges and Object Tracking // In: Moving Object Detection using Background Subtraction. SpringerBriefs in Computer Science. Cham: Springer, 2014. P. 5–11. doi: 10.1007/978-3-319-07386-6_2
11. Barnich O., Droogenbroeck M. V. ViBe: A Universal Background Subtraction Algorithm for Video Sequences // IEEE Transactions on Image Processing. 2011. Vol. 20, iss. 6. P. 1709–1724. doi: 10.1109/TIP.2010.2101613
12. Обухова Н. А. Сегментация объектов интереса на основе признака движения в видеокomпьютерных системах // Инфокоммуникационные технологии. 2007. № 1. С. 77–85.
13. Aslani S., Mahdavi-Nasab H. Optical Flow Based Moving Object Detection and Tracking for Traffic Surveillance // Intern. J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2013. Vol. 7, № 9. P. 1252–1256.
14. Kale K., Pawar S., Dhulekar P. Moving Object Tracking Using Optical Flow And Motion Vector Estimation // 4th Intern. Conf. on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions), Noida, India, 02–04 Sept. 2015. IEEE, 2015. P. 1–6. doi: 10.1109/ICRITO.2015.7359323
15. Обухова Н. А. Априорная оценка достоверности векторов оптического потока (векторов движения) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 30–36.
16. Обухова Н. А. Векторы оптического потока в задачах сегментации и сопровождения подвижных объектов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2006. № 2. С. 42–51.
17. Object detection with deep learning: a review / Z.-Q. Zhao, P. Zheng, S.-T. Xu, X. Wu // IEEE transaction on neural networks and learning systems. 2019. Vol. 30, iss. 11. P. 3212–3232. doi: 10.1109/TNNLS.2018.2876865
18. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A. Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS // Machine Learning and Knowledge Extraction. 2023. № 5. P. 1680–1716. doi: 10.3390/make5040083
19. On model evaluation under non-constant class

imbalance / J. Brabec, T. Komarek, V. Franc, L. Machlica // Intern. Conf. on Computational Science. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2020. P. 74–87. doi: 10.1007/978-3-030-50423-6_6

20. Verma R. A Review of Object Detection and Tracking Methods // Intern. J. of Advance Engineering and Research Development. 2017. Vol. 4, iss. 10. P. 569–578.

21. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability / A. Lukezic, T. Vojir, L. Cehovin Zajc, J. Matas, M. Kristan // Intern. J. of Computer Vision. 2018. Vol. 126, iss. 8. P. 671–688. doi: 10.1007/s11263-017-1061-3

22. Learning color names for real-world applications / J. van de Weijer, C. Schmid, J. Verbeek, D. Lar-

lus // IEEE Trans. Image Proc. 2009. Vol. 18, iss. 7. P. 1512–1523. doi: 10.1109/TIP.2009.2019809

23. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters / J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, J. Batista // IEEE Trans on PAMI. 2015. Vol. 37, iss. 3. P. 583–596. doi: 10.1109/TPAMI.2014.2345390

24. Segment Anything / A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, Ch. Rolland, L. Gustafson // IEEE/CVF Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV), Paris, France, 01–06 Oct. 2023. IEEE, 2023. P. 3992–4003. doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00371

25. Метрики оценки алгоритмов автоматического сопровождения / А. Е. Щелкунов, В. В. Ковалев, К. И. Морев, И. В. Сидько // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1. С. 233–245. doi: 10.18522/2311-3103-2020-1-233-245

Информация об авторах

Обухова Наталия Александровна – доктор технических наук (2009), декан факультета радиотехники и телекоммуникаций, зав. кафедрой телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное зрение и видеоаналитика; машинное обучение и цифровая обработка изображений; видеосистемы и системы поддержки принятия решений; smart-технологии формирования изображений. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: natalia172419@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1953-2085>

Мотыко Александр Александрович – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное зрение; колориметрия; глубокое обучение. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: motyko.alexandr@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4241-4298>

Чиркунова Анастасия Анатольевна – кандидат технических наук (2017), доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – телевизионные системы космического и специального назначения; цифровая обработка изображений; системы формирования, обработки и отображения видеоинформации. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aachirkunova@etu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-7550-2887>

Поздеев Александр Анатольевич – кандидат технических наук (2023), доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений; машинное обучение и интеллектуальный анализ данных; колориметрия. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: puches4@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0003-4051>

Литвинов Елисей Александрович – магистр по направлению "Радиотехника" (2024), аспирант (2024) кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трёх научных публикаций. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений; прикладные телевизионные системы; разработка встраиваемых систем. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: lelisej@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-1387-989X>

References

1. Yu Zhang, Xiangzhi Bai, Tao Wang. Boundary Finding Based Multi-Focus Image Fusion through Multi-Scale Morphological Focus-Measure. *Information Fusion*. 2017, vol. 35, pp. 81–101. doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.006
2. Hossain M. D., Chen D. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of Algorithms and Challenges from Remote Sensing Perspective. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019, vol. 150, pp. 115–134. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009
3. Mobahi H., Rao S., Yang A., Sastry S., Ma Y. Segmentation of Natural Images by Texture and Boundary Compression. *Intern. J. of Computer Vision*. 2011, vol. 95, pp. 86–98.
4. Rao S. R., Mobahi H., Yang A. Y., Sastry S. S., Ma Y. Natural Image Segmentation with Adaptive Texture and Boundary Encoding. *Computer Vision – ACCV 2009. Lecture Notes in Computer Science*. Ed. by H. Zha, R.-i. Taniguchi, S. Maybank. Berlin, Springer, 2010, vol. 5994, pp. 135–146. doi: 10.1007/978-3-642-12307-8_13
5. Gao M., Chen H., Zheng Sh., Fang B., Zhang L. Texture Image Segmentation Using Fused Features and Active Contour. 23rd Intern. Conf. on Pattern Recognition, Cancun, Mexico, 04–08 Dec. 2016. IEEE, 2016, pp. 520–526. doi: 10.1109/ICPR.2016.7899935
6. Bouaynaya N., Charif-Chefchaoui M., Schonfeld D. Spatially Variant Morphological Restoration and Skeleton Representation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2006, vol. 15, iss. 11, pp. 3579–3591. doi: 10.1109/TIP.2006.877475
7. Maggiani L., Salvadori C., Petracca M., Pagano P., Saletti R. Reconfigurable Architecture for Computing Histograms in Real-Time Tailored to FPGA-Based Smart Camera. *IEEE 23rd Intern. Symp. on Industrial Electronics (ISIE)*, Istanbul, Turkey, 01–04 June 2014. IEEE, 2014, pp. 1042–1046. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864756
8. Dalal N., Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. *IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, San Diego, USA, 20–25 June 2005. IEEE, 2005, vol. 1, pp. 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177
9. Kumar S., Yadav J. S. Video Object Extraction and its Tracking using Background Subtraction in Complex Environments. *Perspectives in Science*. 2016, vol. 8, pp. 317–322. doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.064
10. Shaikh S. H., Saeed K., Chaki N. Chapter-2, Moving Object Detection Approaches, Challenges and Object Tracking. In: *Moving Object Detection using Background Subtraction*. SpringerBriefs in Computer Science. Cham, Springer, 2014, pp. 5–11. doi: 10.1007/978-3-319-07386-6_2
11. Barnich O., Droogenbroeck M. V. ViBe: A Universal Background Subtraction Algorithm for Video Sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011, vol. 20, iss. 6, pp. 1709–1724. doi: 10.1109/TIP.2010.2101613
12. Obukhova N. A. Segmentation of Objects of Interest Based on Motion Feature in Video Computer Systems. *Infocommunication Technologies*. 2007, no. 1, pp. 77–85. (In Russ.)
13. Aslani S., Mahdavi-Nasab H. Optical Flow Based Moving Object Detection and Tracking for Traffic Surveillance. *Intern. J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2013, vol. 7, no. 9, pp. 1252–1256.
14. Kale K., Pawar S., Dhulekar P. Moving Object Tracking Using Optical Flow And Motion Vector Estimation. 4th Intern. Conf. on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions), Noida, India, 02–04 Sept. 2015. IEEE, 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICRITO.2015.7359323
15. Obukhova N. A. Apriority Priori Estimation of Optical Flow Vectors (Motion Vectors) Reliability. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2006, no. 3, pp. 30–36. (In Russ.)
16. Obukhova N. A. Optical Flow Vectors in Tasks of Moving Objects Segmentation and Tracking. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2006, no. 2, pp. 42–51. (In Russ.)
17. Zhao Z.-Q., Zheng P., Xu S.-T., Wu X. Object Detection with Deep Learning: a Review. *IEEE Transaction on Neural Networks and Learning Systems*. 2019, vol. 30, iss. 11, pp. 3212–3232. doi: 10.1109/TNNLS.2018.2876865
18. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023, no. 5, pp. 1680–1716. doi: 10.3390/make5040083
19. Brabec J., Komarek T., Franc V., Machlica L. On Model Evaluation under Non-Constant Class Imbalance. *Intern. Conf. on Computational Science. Lecture Notes in Computer Science*. Cham, Springer, 2020, pp. 74–87. doi: 10.1007/978-3-030-50423-6_6
20. Verma R. A Review of Object Detection and Tracking Methods. *Intern. J. of Advance Engineering and Research Development*. 2017, vol. 4, iss. 10, pp. 569–578.
21. Lukezic A., Vojir T., Cehovin Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability. *Intern. J. of Computer Vision*. 2018, vol. 126, iss. 8, pp. 671–688. doi: 10.1007/s11263-017-1061-3
22. Van de Weijer J., Schmid C., Verbeek J., Larlus D. Learning Color Names for Real-World Applications. *IEEE Trans. Image Proc.* 2009, vol. 18, iss. 7, pp. 1512–1523. doi: 10.1109/TIP.2009.2019809
23. Henriques J. F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. *IEEE Trans on PAMI*. 2015, vol. 37, iss. 3, pp. 583–596. doi: 10.1109/TPAMI.2014.2345390
24. Kirillov A., Mintun E., Ravi N., Mao H., Rolland Ch., Gustafson L. Segment Anything. *IEEE/CVF Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, Paris,

France, 01–06 Oct. 2023. IEEE, 2023, pp. 3992–4003.
doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00371

25. Shchelkunov A. E., Kovalev V. V., Morev K. I.,
Sidko I. V. The Metrics for Tracking Algorithms Evalu-

ation. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*. 2020,
no. 1, pp. 233–245. doi: 10.18522/2311-3103-2020-1-
233-245 (In Russ.)

Information about the authors

Natalia A. Obukhova – Dr Sci. in Engineering (2009), Dean of the Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, Head of the Department of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: computer vision and video analytics; machine learning and digital image processing; video systems and decision support systems; smart imaging technologies.

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

E-mail: natalia172419@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1953-2085>

Alexander A. Motyko – Cand. Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: computer vision; colorimetry; deep learning.

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

E-mail: motyko.alexandr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4241-4298>

Anastasia A. Chirkunova – Cand. Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: space and special purpose television systems; digital image processing; video information generation, processing and display systems.

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

E-mail: aachirkunova@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0001-7550-2887>

Alexander A. Pozdeev – Cand. Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: digital image processing; machine learning and data mining; colorimetry

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

E-mail: puches4@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0003-4051>

Elisey A. Litvinov, Master's degree in Radio Engineering, postgraduate student of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of three scientific publications. Area of expertise: digital image processing; applied television systems; development of embedded systems.

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

E-mail: lelisej@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-1387-989X>

Определение характеристик морской поверхности по радиолокационным изображениям с использованием градиентных методов

К. Ю. Лаптев, Н. В. Соколов, В. Н. Михайлов[✉], М. И. Богачев, Е. Н. Воробьев

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

[✉] vnmikhaylov@etu.ru

Аннотация

Введение. Дистанционное зондирование и мониторинг морской поверхности имеют огромное значение в контексте решения задач оперативной океанографии, экологического мониторинга и ряда др. Возможность оперативной оценки состояния морской поверхности особенно актуальна в зонах, представляющих опасность для судоходства, где быстрое и точное реагирование становится критически важным. Современные радиолокационные станции (РЛС) при обзоре формируют последовательности цифровых радиолокационных изображений (РЛИ), аналогичные последовательностям кадров в видеопотоке, что обуславливает возможность применения для их вторичной обработки градиентных методов, зарекомендовавших себя при анализе видеоданных.

Цель работы. Определение характеристик морского волнения по РЛИ с использованием методов градиентной оценки движения. Использование градиентных методов позволит реализовать дополнительные инструменты обработки изображений, формируемых при отражении зондирующих сигналов от морской поверхности.

Материалы и методы. Для оценки характеристик морской поверхности по РЛИ использованы градиентные методы. Для их обучения служили серии синтезированных изображений морской поверхности, полученные методом математического моделирования. Эффективность градиентных методов оценивалась по экспериментальным РЛИ, предоставленным ИО РАН им. Ширшова.

Результаты. С помощью градиентных методов вычислены направление и скорость волнения по нескольким последовательным обзорам РЛС. Построены регрессионные модели зависимости вычисленных значений от заданных. При определении направления волнения высокую эффективность продемонстрировали методы Farneback и TV-L1.

Заключение. Алгоритм вычисления скорости и направления смещения морской поверхности с помощью градиентных методов был предварительно обучен с применением модельных данных. Выполнена верификация реализованных методов и алгоритмов оценки скорости и направления морского волнения на предмет адекватности и реалистичности получаемых результатов сравнением с экспериментальными изображениями, найденными с использованием корабельных РЛС.

Ключевые слова: радиолокация, морская поверхность, алгоритм Лукаса–Канаде, алгоритм Farneback, TV-L1, линейная регрессия

Для цитирования: Определение характеристик морской поверхности по радиолокационным изображениям с использованием градиентных методов / К. Ю. Лаптев, Н. В. Соколов, В. Н. Михайлов, М. И. Богачев, Е. Н. Воробьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 41–53. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-41-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках темы Государственного задания FSEE-2020-0002.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ИО РАН им. Ширшова за любезно предоставленные данные экспериментальных океанографических наблюдений.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; принята к публикации после рецензирования 17.10.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



Measurement of Sea Surface Characteristics from Radar Images Using Gradient Methods

Kirill Yu. Laptev, Nikita V. Sokolov, Viacheslav N. Mikhailov✉,
Mikhail I. Bogachev, Evgenii N. Vorobev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉vnmikhaylov@etu.ru

Abstract

Introduction. Remote sensing and monitoring of the sea surface are of great importance in such fields, as operational oceanography, environmental monitoring, etc. The ability to quickly assess the state of the sea surface is particularly relevant in areas that pose a danger to shipping, where rapid and accurate response becomes critical. Modern radars represent information as digital image series largely reminiscent to a frame series in a video stream, thus enabling the use of gradient methods originally designed for and proven successful in video analysis.

Aim. Determination of sea wave characteristics from radar images using gradient motion estimation methods. The use of gradient methods will allow implementing additional tools for processing radar image series obtained from sea backscatter.

Materials and methods. To assess the characteristics of the sea surface from radar images, gradient methods were used. To train the methods, a series of synthetic images of the sea surface obtained by mathematical modeling were used. To evaluate the effectiveness of the gradient methods, two representative experimental radar image series provided by the Institute of Oceanography RAS were employed.

Results. Using gradient methods, the direction and speed of waves were calculated from several consecutive radar observations. Regression models of the dependence of calculated values on the specified ones were constructed. The Farneback and TV-L1 methods proved to be effective especially for obtaining the direction of the sea waves.

Conclusion. An algorithm for evaluating speed and direction of the sea surface displacement using gradient methods was pre-trained using simulated model data. The implemented methods and algorithms for assessing the speed and direction of sea waves were validated using two experimental image series obtained from shipborne navigational radars.

Keywords: radar, sea surface, Lucas–Kanade algorithm, Farneback algorithm, TV-L1, linear regression

For citation: Laptev K. Yu., Sokolov N. V., Mikhailov V. N., Bogachev M. I., Vorobev E. N. Measurement of Sea Surface Characteristics from Radar Images Using Gradient Methods. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 41–53. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-41-53

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

Source of funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education in the framework of the state assignment FSEE-2020-0002.

Acknowledgments. The authors would like to express their deep gratitude to the staff of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences for kindly providing experimental oceanographic observation data.

Submitted 21.06.2024; accepted 17.10.2024; published online 29.11.2024

Введение. Дистанционное зондирование и мониторинг морской поверхности имеют огромное значение как для обеспечения безопасности судоходства (в особенности в мелководьях, проливах, узкостях, где быстрое и точное определение характеристик морской поверхности становится критически важным), так и для решения задач экологического мониторинга и ряда др. Согласно требованиям морского регистра суда, допущенные к мореплаванию, независимо от назначения, в обязательном порядке оснащаются

навигационными радиолокационными станциями (РЛС), что обуславливает значительный размер парка эксплуатируемых устройств и систем. Современные РЛС предоставляют навигационную информацию в виде цифровых изображений, отображаемых на цветном или полутонном дисплее, формируемых при каждом обзоре. Таким образом, данные последовательных обзоров морской поверхности с использованием корабельных РЛС можно представить в виде серии цифровых изображений.

Ввиду изложенного перспективной представляется дополнительная обработка указанных изображений для определения характеристик морской поверхности с целью информирования об опасном для судоходства волнении, решения задач экологического мониторинга и ряда др. Для достижения цели необходимы методы обработки радиолокационных изображений, полученных при зондировании морской поверхности в зависимости от структуры и характеристик волнения. В статье описывается подход к определению динамических характеристик морского волнения по последовательным радиолокационным изображениям (РЛИ) с использованием методов градиентной оценки движения.

Градиентные методы оценки поля скоростей. Градиентные методы оценки движения объектов – это класс методов, используемых для определения скорости и направления движения объектов на основе анализа изменения их характеристик (например, яркости в случае видеоизображений) в пространстве и во времени.

Изначально полагалось, что при определении движения объекта значения яркости пикселей, относящихся к этому объекту, переходят от кадра к кадру без изменений [1–3]. Другими словами, интенсивность пикселей преобразуется от одного кадра к следующему:

$$I(\mathbf{x}, t) = I(\mathbf{x} + \mathbf{u}, t + 1),$$

где $I(\mathbf{x}, t)$ – интенсивность изображения как функция пространства $\mathbf{x} = (x, y)^T$ и времени t ; $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ – двумерная скорость.

Алгоритмы оптического потока предлагают способ оценки движения по последовательности изображений. Вычисление оптического потока играет ключевую роль в нескольких приложениях компьютерного зрения, включая обнаружение движения и сегментацию, интерполяцию кадров, реконструкцию трехмерной сцены, навигацию роботов и сжатие видео.

Алгоритм Лукаса–Канаде использует ограничение на постоянство интенсивности пикселей. Наличие двух неизвестных переменных в одном уравнении дает:

$$I_x v_x + I_y v_y + I_t = 0,$$

где I_x , I_y и I_t – производные функции изображения $I(x, y)$ относительно x , y и t . Вектор $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ определяет вектор скорости в направлениях x и y .

Метод Лукаса–Канаде – это задача локальной оптимизации, которую невозможно решить должным образом, если перемещения объекта слишком велики. Поскольку информация о градиенте получена по соседним пикселям, реальное движение объекта не может выходить за пределы рассматриваемой области. Кроме того, локальная область, учитываемая при использовании метода наименьших квадратов, конечна, и шансы правильно определить большие перемещения невелики. Поэтому обычно используется пирамидальная реализация. Размер входных изображений изменяется до более низкого разрешения – сначала фильтрацией с помощью фильтра нижних частот, а затем с помощью подвыборки с коэффициентом 2, что называется методом "от грубого к мелкому" (рис. 1). Расчет оптического потока начинается с изображений с самым низким разрешением на самом высоком пирамидальном уровне. Затем результат передается на уровень с более высоким разрешением в качестве начальной оценки. Выполнение алгоритма с более высоким разрешением приводит к повышению точности поля потока [4, 5].

Помимо классических алгоритмов оптического потока существуют более современные методы для оценки движения, например алгоритм Farneback. Он основан на аппроксимации соседствующих окрестностей для каждой пары кадров с помощью квадратичных полиномов за счет преобразования полиномиального разложения.

Идея полиномиального разложения заключается в аппроксимации некоторой окрестности каждого пикселя полиномом. Используются только квадратичные полиномы, дающие локальную модель сигнала, выраженную в локальной системе координат:

$$f(x) \sim x^T A x + \mathbf{b}^T x + c,$$

где A – симметричная матрица; $\mathbf{b}$ – вектор; c – скаляр. Коэффициенты оцениваются на основе взвешенного метода наименьших квадратов, соответствующего значениям сигнала в окрестности.

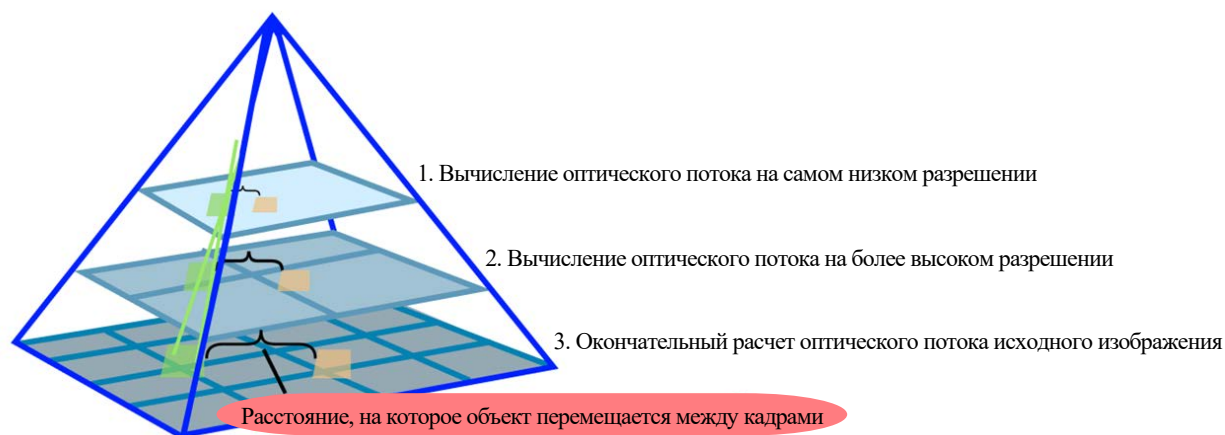


Рис. 1. Трехуровневая пирамида разрешений

Fig. 1. Three-level resolution pyramid

В методе Farneback используются локальные полиномиальные аппроксимации. Вычисления начинаются с полиномиального разложения двух кадров и получения коэффициентов разложения $A_1(x)$, $b_1(x)$ и $c_1(x)$ для первого изображения и $A_2(x)$, $b_2(x)$ и $c_2(x)$ для второго изображения.

Таким образом, алгоритм Farneback генерирует пирамиду изображений, где каждый уровень имеет разрешение ниже предыдущего уровня (рис. 1). При выборе уровня пирамиды, превышающего 1, алгоритм может отслеживать точки на нескольких уровнях разрешения, начиная с самого низкого уровня. Увеличение числа уровней пира-

миды позволяет алгоритму обрабатывать большие перемещения точек между кадрами [6].

Алгоритм вычисления оптического потока TV-L1 является вариационным, который в свою очередь относится к плотным методам и основывается на предположении о том, что яркость пикселей от кадра к кадру остается постоянной.

Вариационные методы вычисления оптического потока считаются наиболее точными, но при этом являются наиболее вычислительно сложными.

Решение вариационной задачи вычисления оптического потока через минимизацию функционала выражается следующим образом:

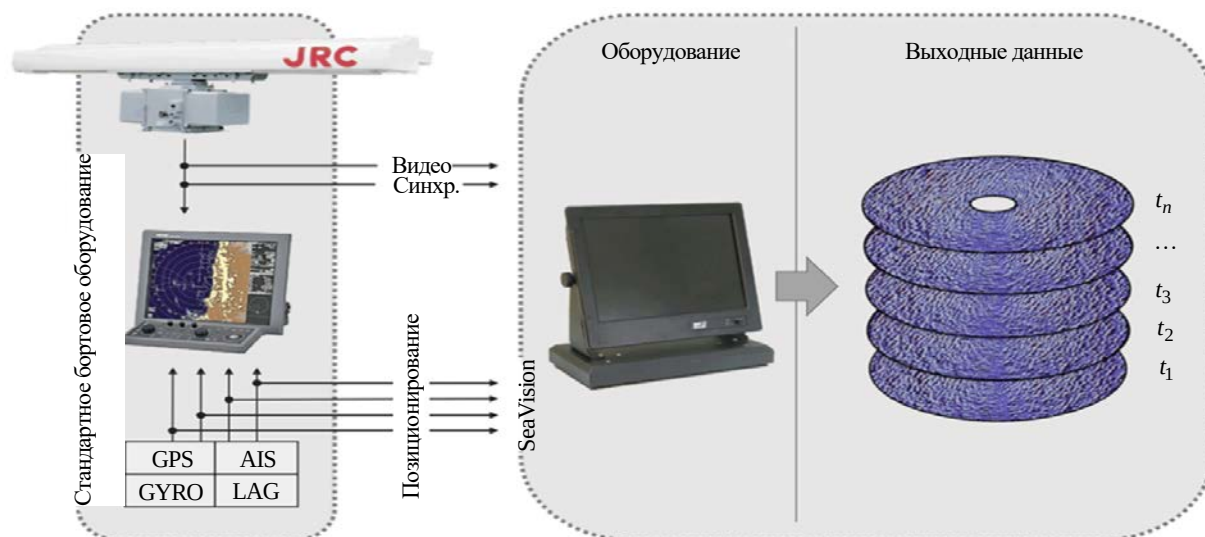


Рис. 2. Интеграция SeaVision в навигационное оборудование судна вместе с примером серии географически стабилизированных (в северном направлении) изображений морского волнения, по одному для каждого поворота антенны [9]

Fig. 2. SeaVision integration to the ship's navigational equipment together with an example of the series of the geographically stabilized (northward) sea clutter images, one for each antenna turn [9]

$$E(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int \left(\psi \left\{ [I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{x})]^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \gamma |\nabla I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - \nabla I(\mathbf{x})|^2 \right\} + \alpha \psi(|\nabla \mathbf{u}|^2 + |\nabla \mathbf{v}|^2) \right) d\mathbf{x},$$

где I – изображение; $\mathbf{x} = (x, y, t)^T$ – координаты пикселя на изображении; $\mathbf{w} = (u, v, 1)^T$ – вектор смещения между пикселями двух изображений в моменты времени t и $t+1$; $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^T$ – пространственный градиент; γ – коэффициент между яркостью и градиентом яркости; $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, формализующий требование к гладкости искомого вектора смещений; $\psi(s^2) = \sqrt{s^2 + \varepsilon^2}$ – функция регуляризации, определяющая устойчивость минимизации функционала к изменениям яркости и гладкости поля [7].

В отличие от алгоритма Lucas–Kanade, TV-L1 наиболее устойчив к нарушениям постоянства яркости пикселей. Алгоритм, реализующий этот метод, можно разделить на 2 модуля: процедуру вычисления оптического потока в заданном масштабе и основной алгоритм, который реализует пирамидальную схему и вызывает процедуру для получения приближенных решений.

Процедура обновляет векторное поле $\mathbf{u}$ и использует 3 временных векторных поля $\mathbf{v}$, $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ для выполнения промежуточных вычислений. Начальное значение $\mathbf{u}_0$ из $\mathbf{u}$ задается прилагаемой многомасштабной процедурой и на самом грубом уровне равно нулю [8].

В библиотеке для обработки изображений scikit-image есть функция TV-L1, которая реализует алгоритм для вычисления оптического потока. Функция TV-L1 принимает 2 изображения как входные данные и возвращает матрицу оптического потока. Каждое значение в матрице оптического потока представляет собой скорость изменения пикселя в направлениях x и y .

Получение радиолокационных картин морской поверхности. В описываемой работе в качестве исходных данных используются РЛИ, полученные по результатам двух серий измерений, выполненных сотрудниками ИО РАН им. Ширшова в рамках экспедиционных исследований в Северной Атлантике [9]. Данные регистрировались интегрированной системой

SeaVision, предназначенной для наблюдений за морской поверхностью и волнами в открытом океане с использованием стандартных навигационных морских радаров X-диапазона. Данные дистанционного зондирования сверялись с измерениями на месте, которые были доступны с буев (таких, как буи NDBC или NOWPHAS). Буи измеряют вертикальные и горизонтальные смещения поверхности океана (например, буй-корректировщики или буи для сбора данных с частотой дискретизации до 2.5 Гц) и предоставляют высокоточные оценки характеристик взволнованной морской поверхности.

Система SeaVision использовалась в режиме свободного дрейфа судна с выключенными двигателями совместно со свободно дрейфующим буюм-наблюдателем, что позволяло независимо измерять характеристики морского волнения с помощью данной системы и измерительного буя. Записи выполнялись в свободном плавании на протяжении не менее 30 мин. Кроме того, в течение всего времени измерений регистрировались стандартные метеорологические параметры с помощью бортовой метеостанции.

Научно-исследовательские суда "Академик Сергей Вавилов" и "Академик Иоффе" оснащены стандартными навигационными радаром X-диапазона JRC JMA-9110-6XA и JMA-9122-6XA, технические характеристики которых приведены в [9]. Оба радара работают на частоте 9.41 ГГц (длина волны ≈ 3 см) и оснащены 6-футовой антенной с горизонтальным разрешением по направлению 1.2° . Опционально радары могут работать с длительностью импульсов 0.08, 0.25, 0.5, 0.8 и 1.0 мкс. В данном случае использовалась наименьшая возможная длительность импульса – 0.08 мкс (в так называемом режиме короткого импульса – SP1), обеспечивая максимально возможное разрешение изображения (и, следовательно, наилучшее разрешение поверхности океана). Данные радары X-диапазона характеризуются длиной волны излучаемых электромагнитных волн 3.18 см. Длительность импульса – это время излучения волнового пучка; таким образом, количество излучаемых волн и площадь отражения на поверхности океана (определяющая пространственное разрешение) увеличиваются с ростом продолжительности импульса.

SeaVision обеспечивает оцифровку и дальнейшую запись стабилизированного по направлению (на север) радарного изображения морской поверхности, получаемого при каждом полном обороте антенны, а также преобразование изображения морской поверхности в цифровой формат и его сохранение на внешнем запоминающем устройстве. Также независимо регистрируются географические координаты судна по данным ГНСС, скорость движения и курс по данным автономных измерителей. Полученные РЛИ морской поверхности при каждом обороте РЛС сохраняются в виде матрицы размером 4096×4096 (дискретизация 1.875 м при 4096 направлениях луча). На этапе последующей обработки эти файлы дополнительно объединяются и преобразуются в формат NetCDF [9].

Моделирование морского волнения под влиянием ветров и течений. Основная идея использованной математической модели состоит в представлении морской поверхности в виде суперпозиции числа элементарных волн с различными собственными параметрами. Статистическое моделирование морской поверхности при таком подходе можно реализовать методом гармонического синтеза [10–12]. Тогда амплитуда волнений

$$z(x, y, t) = \sum_{p=1}^{N_{\omega}} \sum_{q=1}^{N_{\psi}} \sqrt{2S_{p,q} \Delta\omega \Delta\psi} \times \\ \times \sin[k(x \cos(\psi) + y \sin(\psi)) - \omega t + \varepsilon],$$

где N_{ω} – число составляющих частотного спектра; N_{ψ} – число составляющих углового спектра; $S_{p,q}$ – матрица энергетического спектра; $\Delta\omega = \frac{\omega_{\max}}{N_{\omega}}$ – шаг по частоте, рад/с; $\Delta\psi = \frac{2\pi}{N_{\psi}}$ – шаг по углу, рад; x, y, t – текущие пространственно-временные координаты; k – волновое число.

Глубина освещаемого участка водоема при моделировании задается через дисперсионное соотношение [13]:

$$\omega = \sqrt{gk \left(1 + \frac{\sigma}{\rho g} k^2 \right) \text{th}(kR)},$$

где k – волновое число; $\sigma = 74.34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ – поверхностное натяжение на границе раздела сред воздух/морская вода; ρ – плотность воды; R – глубина моря.

Вышеприведенные формулы для угловых спектров соответствуют направлению ветра вдоль оси OX . Направление ветра учитывается в формуле для построения профиля морской поверхности заменой координат: $x \rightarrow x_{\varphi}$; $y \rightarrow y_{\varphi}$ с помощью преобразования [9]:

$$\begin{cases} x_{\varphi} = x \cos(\varphi) - y \sin(\varphi), \\ y_{\varphi} = y \sin(\varphi) + x \cos(\varphi). \end{cases}$$

Для обеспечения идентичности процедуры обработки модельных и экспериментальных данных с учетом системы координат, пространственно-временного разрешения и размерности данных моделирование производилось в полярных координатах [11]:

$$z(r, \theta, t) = \sum_{p=1}^{N_{\omega}} \sum_{q=1}^{N_{\psi}} \sqrt{2S_{p,q} \Delta\omega \Delta\psi} \times \\ \times \sin\{k[r \cos(\theta) \cos(\psi) + r \sin(\theta) \sin(\psi)] - \omega t + \varepsilon\}.$$

Направление ветра в этом случае учитывается следующей заменой переменной: $\theta_{\varphi} = \theta + \varphi$.

Двумерный энергетический спектр представляется произведением [13]:

$$S(\omega, \psi) = S_1(\omega) S_d(\omega, \psi),$$

где $S_1(\omega)$ – одномерный спектр волнения, показывающий распределение энергии морского волнения по частотам; $S_d(\omega, \psi)$ – угловой спектр, характеризующий распределение энергии по азимуту.

Одномерный спектр ветровых волн обычно описывается спектром Пирсона–Московица [14]:

$$S_1(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} g^2 \omega^{-5} \exp[-0.74(\omega_m/\omega)^4],$$

где $\omega_m = \frac{g}{v_{19.5}}$; g – ускорение свободного падения; $v_{19.5}$ – скорость ветра на высоте 19.5 м, или же с помощью спектра JONSWAP [15]:

$$S_1(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \times \\ \times \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \mu \exp \left[\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\beta^2 \omega_m^2} \right],$$

$$\text{где } \alpha = 0.076 \left(\frac{v_{10}^2}{gX} \right)^{0.22}; \mu = 3.3; \begin{cases} \beta = 0.07, \omega \leq \omega_m, \\ \beta = 0.09, \omega > \omega_m; \end{cases}$$

X – область разгона, м; v_{10} – скорость ветра на высоте 10 м.

Частота максимума спектра

$$\omega_m = 7\pi \left(\frac{g^2}{v_{10} X} \right)^{0.33}.$$

В описываемой работе для моделирования использовался спектр JONSWAP, поскольку он имеет большую энергию вблизи максимума, что позволяет получить более ярко выраженное волнение.

Угловой спектр морского волнения можно описать различными выражениями, основные из которых представлены в [11]. Для моделирования было выбрано представление, использующее аппроксимацию спектра на основе квадрата косинуса [10, 16]:

$$S_d(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta), \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2},$$

где $\theta = \psi - \psi_0$; ψ_0 – угол между направлением наблюдения и направлением ветра.

В дальнейшем результат моделирования преобразовывался в декартовы координаты для обучения исследуемых алгоритмов. Итог работы программы моделирования – изображение морской поверхности (рис. 3).

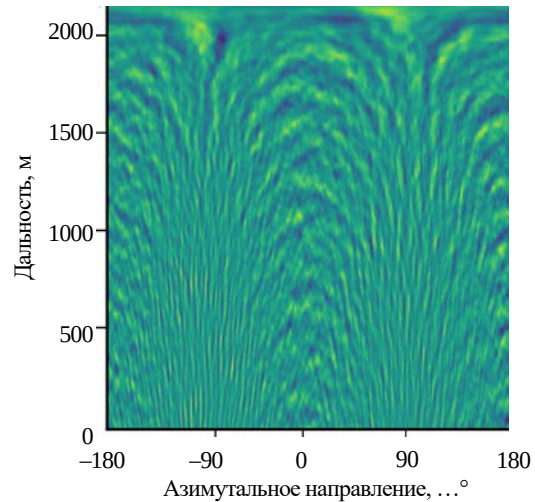


Рис. 3. Результат моделирования морской поверхности с учетом времени вращения лоатора

Fig. 3. Modeling the sea surface, taking the locator rotation time into account

Вычисление направления и скорости волн градиентными методами. Для адаптации градиентных методов к условиям поставленной задачи необходимо учесть, что "типичную" съемку можно считать мгновенной, поскольку короткая выдержка и большая пауза между кадрами, а формирование РЛИ – непрерывный процесс. Следовательно, появится систематическая линейная составляющая ошибки, которую необходимо компенсировать. Кроме того, исходные данные представлены в системе "азимут-дальность", а методы рассчитаны на декартову систему координат, в связи с чем необходим переход из одной системы координат в другую (рис. 4).

В работе для определения направления и скорости волнения по моделям картин морской поверхности используются 3 метода: Lucas–



Рис. 4. Перевод данных из системы "азимут-дальность" в декартову систему координат

Fig. 4. Converting data from the azimuth-range system to the Cartesian coordinate system

Kanade, Farnebäck и TV-L1. Для моделей картин морской поверхности заданы характеристики:

- скорость приповерхностного ветра ($v_w = 5, 10$ м/с);
- направление приповерхностного ветра ($d_w = 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135$ и 157.5°);
- скорость течения ($v_c = 0.5$ м/с);
- направление течения ($d_c = 0^\circ$);
- время полного оборота радара ($t_{obs} = 2.4$ с).

Каждый файл данного вида моделей состоит из пяти кадров, имитирующих 5 последовательных круговых обзоров РЛС.

В табл. 1 представлены средние значения времени выполнения каждого метода для одного файла (5 кадров). Эти значения получены для процессора i5-9300H с использованием стандартных процедур без дополнительной оптимизации под параллельные вычисления и могут быть потенциально уменьшены при реализации адаптированного кода под параллельные вычислители.

На рис. 5 представлены боксовые диаграммы среднеквадратичной ошибки (RMSE) оце-

ненных значений скорости смещения морской поверхности. Использованы результаты накопления статистики по всем направлениям при заданных значениях скорости ветра 5 и 10 м/с. При этом истинная скорость смещения морской поверхности оценивалась как суммарный вектор течения и приповерхностного ветра. Из рис. 5 видно, что с увеличением скорости ветра ошибка ее оценки уменьшается, и при слабом ветре наименьшей ошибкой характеризуется метод Farnebäck.

Для оценки эффективности каждого из методов были построены модели линейной регрессии, вычислен коэффициент детерминации R^2 , скорректированный (Adjusted) R^2 и определена статистическая значимость регрессионных моделей (p -value). Переменные-предикторы – вычисленные методами Lucas–Kanade, Farnebäck и TV-L1 значения направления и скорости волн. Целевая переменная – заданные в моделях значения направления и скорости волн.

В табл. 2 и 3 приведены уравнения регрессии и статистики для трех методов определения направления и скорости движения волн соответственно.

Визуализация результатов регрессии по определению направления движения волн представлена на рис. 6, где по оси абсцисс отложены заданные в моделях значения направления волн, а по оси ординат – вычисленные тремя градиентными методами (данные стандартизированы).

Табл. 1. Среднее время выполнения методов оценки движения
Tab. 1. Average execution time of motion estimation methods

Метод	Затраченное время, с
Lucas–Kanade	2
Farnebäck	16
TV-L1	251

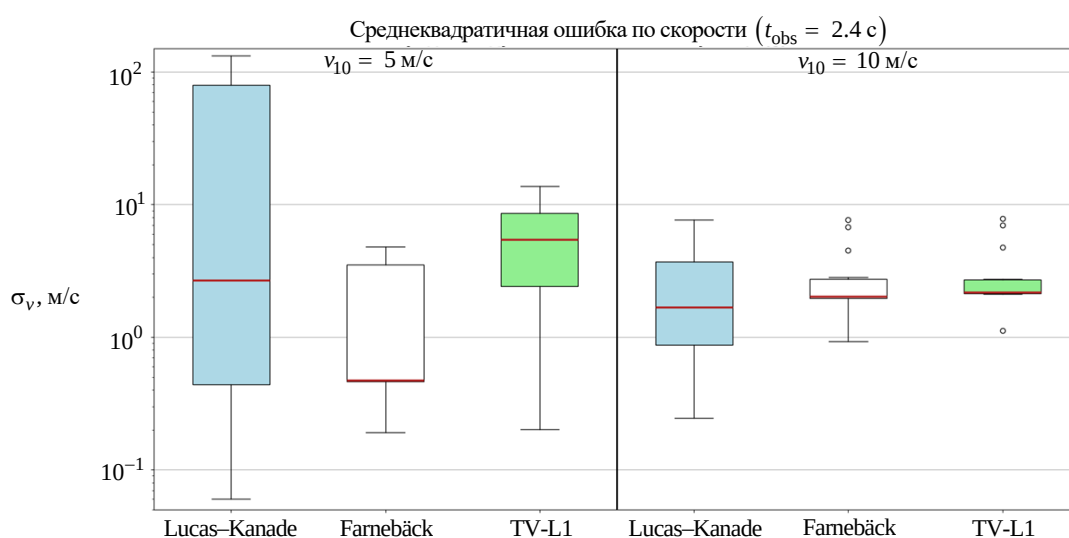


Рис. 5. Боксовые диаграммы для среднеквадратичной ошибки по скорости

Fig. 5. Box plots for the RMSE of the calculated speed values

Табл. 2. Результаты регрессии для определения направления

Tab. 2. Regression results for determining direction

Метод	Уравнение регрессии	R^2	Adj. R^2	p -value
Lucas–Kanade	$y = 18.2641 + 0.9026x$	0.800	0.792	$7.24 \cdot 10^{-10}$
Farneback	$y = 22.0069 + 0.9277x$	0.775	0.766	$3.01 \cdot 10^{-9}$
TV-L1	$y = 23.1308 + 0.9029x$	0.776	0.767	$2.86 \cdot 10^{-9}$

Табл. 3. Результаты регрессии для определения скорости

Tab. 3. Regression results for determining velocity

Метод	Уравнение регрессии	R^2	Adj. R^2	p -value
Lucas–Kanade	$y = 86.4140 + 5.8806x$	0.058	0.019	0.234
Farneback	$y = 4.9579 + 0.2334x$	0.379	0.354	0.000806
TV-L1	$y = 9.8675 + 0.0821x$	0.005	0.005	0.724

Результаты показывают, что градиентные методы обладают высокой эффективностью при определении направления движения волн. Однако их эффективность при нахождении скорости движения волн значительно хуже, только Farneback имеет статистическую значимость.

После обучения алгоритма на модельных данных произведено апробирование на РЛИ, полученных от ИО РАН им. Ширшова по результатам двух экспедиций в Северную Атлантику. По вычисленным тремя методами значениям направления волн построены боксовые диа-

граммы (рис. 7), где синей горизонтальной линией отображено направление ветра (5 и 10 м/с), полученное от судовой метеостанции, а штриховой линией – направление дрейфа буя. Для уточненной оценки характеристик морской поверхности сформированные векторы усредняются по всей площади изображения и по 51 последовательному обзору РЛС.

Заключение. Для реализации радиолокационных систем и последующего анализа получаемых данных строятся модели. Возможность использования тех или иных методов для опре-

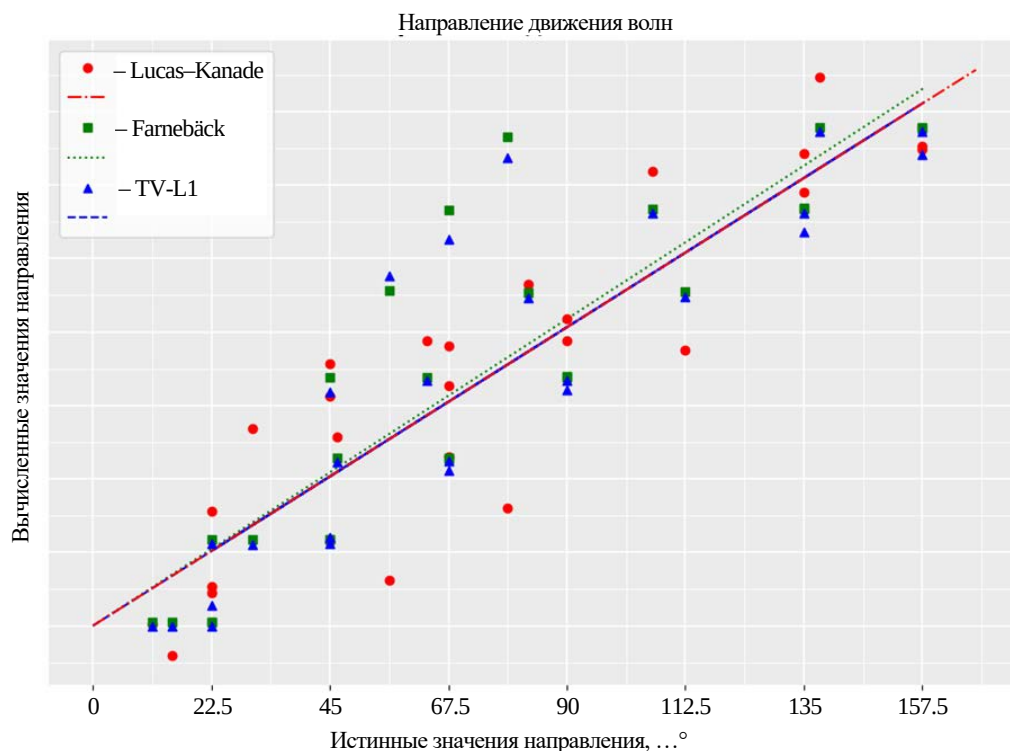


Рис. 6. Результаты построения линейной регрессии

Fig. 6. Results of constructing linear regression

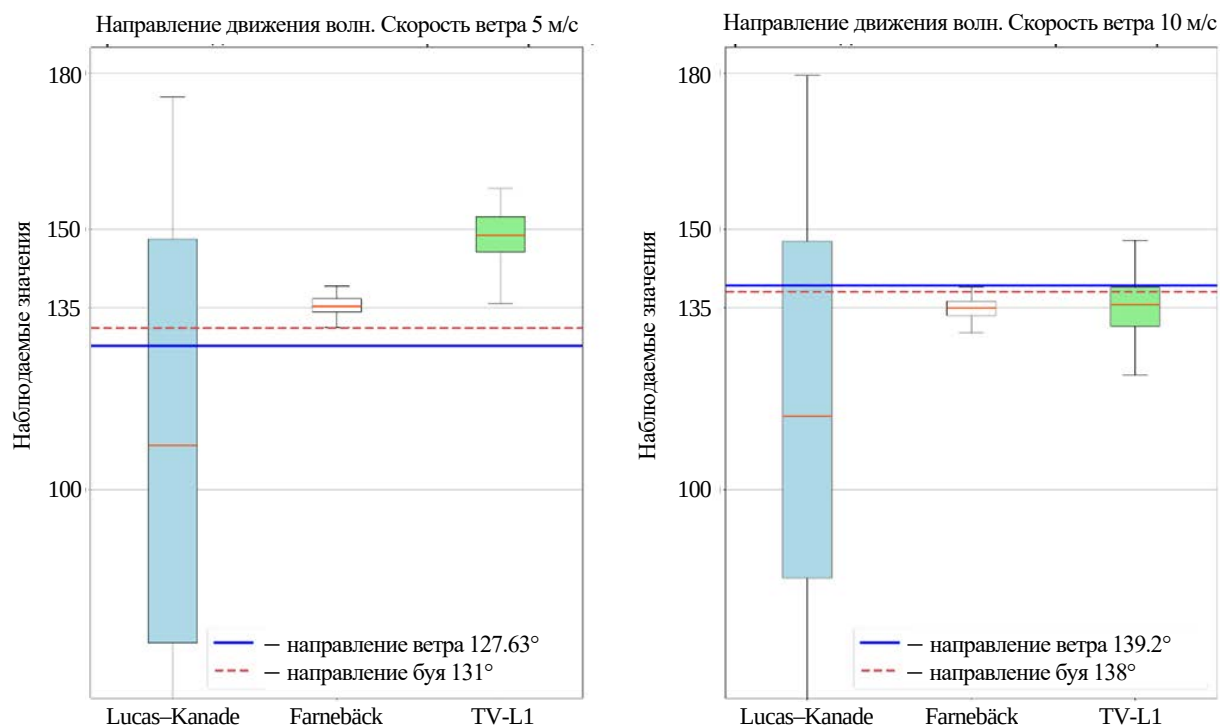


Рис. 7. Боксовые диаграммы вычисленных значений направления волн

Fig. 7. Boxplots of computed wave direction values

деления характеристик акватории определяется на моделях. Выполнена верификация разработанной программы синтеза картин морской поверхности на предмет адекватности и реалистичности получаемых результатов моделирования посредством сравнения с записями, полученными с использованием корабельных РЛС.

В описанной работе предлагается дополнительная обработка радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности, при помощи градиентных методов с целью информирования об опасном для судоходства волнении.

После построения моделей линейной регрессии и получения коэффициентов уравнений (наклон линии регрессии) алгоритм был обучен на модельных данных и протестирован на реальных.

Результаты показывают, что при слабом ветре методы Lucas-Kanade и TV-L1 демон-

стрируют низкую эффективность в определении скорости движения волн. Это связано с их чувствительностью к слабым скоростям движения объектов. В то же время, метод Farnebäck продемонстрировал устойчивость и способность определять скорость даже в условиях слабого ветра. Для определения направления эффективны методы Farnebäck и TV-L1 (значения скорректированного коэффициента R^2 составляют 0.766 и 0.767 соответственно). Однако TV-L1 требует значительно больших временных затрат, чем Farnebäck и Lucas-Kanade. Самым эффективным методом с точки зрения точности и быстродействия для определения направления и скорости волнения по радиолокационным изображениям морской поверхности оказался Farnebäck, в связи с чем целесообразно использовать именно его.

Авторский вклад

Лаптев Кирилл Юрьевич – статистический анализ данных; программная реализация алгоритма для обработки данных; визуализация и статистическая оценка значимости полученных результатов.

Соколов Никита Владимирович – разработка алгоритма и реализация программного модуля; обеспечивающего моделирование морского волнения.

Михайлов Вячеслав Николаевич – разработка математической модели морской поверхности.

Богачев Михаил Игоревич – разработка концепции исследований и интерпретация результатов.

Воробьев Евгений Николаевич – статистическая обработка экспериментальных данных; валидация результатов исследований.

Author's contribution

Kirill Yu. Laptev, performing statistical analysis of data; writing an algorithm for data processing; visualization and statistical assessment of the significance of the results obtained.

Nikita V. Sokolov, development of an algorithm and implementation of a software module that provides modeling of sea waves.

Viacheslav N. Mikhailov, development of a mathematical model of the sea surface

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

Evgenii N. Vorobev, statistical processing of experimental data; validation of the results.

Список литературы

1. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical Flow // Artificial Intelligence. 1981. № 17. P. 185–204.
2. Freeman W., Adelson E. H. The design and use of steerable filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991. Vol. 13, iss. 9. P. 891–906. doi: 10.1109/34.93808
3. Feet D., Weiss Y. Optical Flow Estimation. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. New York: Springer, 2006. P. 237–257. doi: 10.1007/0-387-28831-7
4. Bouquet J. Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description. Santa Clara, USA: Intel Corporation Microsoft Research Lab, 2000. P. 1–9.
5. Sharmin N., Brad R. Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow // Sensors. 2012. Vol. 12, iss. 9. P. 12694–12709. doi: 10.3390/s120912694
6. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // Proc. of the 13th Scandinavian Conf. on Image Analysis, Halmstad, Sweden, SCIA, 2003. P. 363–370.
7. Беляков П. В., Никифоров М. Б. Вариационный метод вычисления оптического потока в системе-на-кристалле // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 76–82.
8. Pérez J. S., Meinhardt E., Facciolo G. TV-L1 Optical Flow Estimation // Image Processing On Line. 2013. № 3. P. 137–150. doi: 10.5201/ipol.2013.26
9. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III / N. Tilinina, D. Ivonin, A. Gavrikov, V. Sharmar, S. Gulev, A. Suslov, V. Fadeev, B. Trofimov, S. Bargman, L. Salavatova, V. Koshkina, P. Shishkova, O. Razorenova, A. Sokov // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14, iss. 8. P. 1–25. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022
10. Абузьяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 166 с.
11. Флуктуационный анализ моделей морской поверхности / В. Н. Михайлов, Н. С. Пыко, М. И. Богачев, В. М. Кутузов // Вестн. НовГУ. 2023. Т. 130, № 1. С. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145
12. Massel S. R. Ocean Surface Wave: Their Physics and Prediction. World Scientific Publishing, 1996. 491 p.
13. Пыко Н. С., Орандаренко Е. Д., Богачев М. И. Статистический анализ локальных экстремумов взволнованной морской поверхности на основе данных математического моделирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Vol. 26, № 5. P. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111
14. 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, № 24. P. 5181–5190.
15. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / K. Hasselmann, T. Barnett, E. Bouws et al. Hamburg: Deutsches Hydrographisches institute, 1973. 95 p.
16. Modeling arrival scattering due to surface roughness / O. C. Rodriguez, A. J. Silva, J. P. Gomes, S. M. Jesus // Proc. of the 10th European Conf. on Underwater Acoustics, Istanbul, Turkey, 5–9 July 2010. P. 1–8.

Информация об авторах

Лаптев Кирилл Юрьевич – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2024), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – статистический анализ данных, математическое моделирование.

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

E-mail: kirikill76@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2110-0568>

Соколов Никита Владимирович – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)). Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

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

E-mail: falconsnv@yandex.ru

Михайлов Вячеслав Николаевич – инженер по специальности "Радиотехника" (2000), старший научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация; математическое моделирование. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vnmikhaylov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8155-9310>

Богачев Михаил Игоревич – доктор технических наук (2018), доцент (2011), профессор кафедры радиотехнических систем, главный научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 200 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: rogex@yandex.com
<http://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

Воробьев Евгений Николаевич – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – полуактивная радиолокация; радиолокационное распознавание. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: envorobev@etu.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

References

1. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*. 1981, no. 17, pp. 185–204.
2. Freeman W., Adelson E. H. The Design and Use of Steerable Filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991, vol. 13, iss. 9, pp. 891–906. doi: 10.1109/34.93808
3. Feet D., Weiss Y. Optical Flow Estimation. *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. New York, Springer, 2006, pp. 237–257. doi: 10.1007/0-387-28831-7
4. Bouguet J. Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description. Santa Clara, USA, Intel Corporation Microsoft Research Lab, 2000, pp. 1–9.
5. Sharmin N., Brad R. Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow. *Sensors*. 2012, vol. 12, iss. 9, pp. 12694–12709. doi: 10.3390/s120912694
6. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. *Proc. of the 13th Scandinavian Conf. on Image Analysis*, Halmstad, Sweden, SCIA, 2003, pp. 363–370.
7. Belyakov P. V., Nikiforov M. B. *Variacionnyy metod vychisleniya opticheskogo potoka v sisteme-nakristalle* [System-on-Chip Variational Optical Flow Computation]. *Digital Signal Processing*, 2018, no. 3, pp. 76–82. (In Russ.)
8. Pérez J. S., Meinhardt E., Facciolo G. TV-L1 Optical Flow Estimation. *Image Processing On Line*. 2013, no. 3, pp. 137–150. doi: 10.5201/ipol.2013.26
9. Tilinina N., Ivonin D., Gavrikov A., Sharmar V., Gulev S., Suslov A., Fadeev V., Trofimov B., Bargman S., Salavatova L., Koshkina V., Shishkova P., Razorenova O., Sokov A. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and Its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III. *Earth System Science Data*. 2022, vol. 14, iss. 8, pp. 1–25. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022
10. Abuzyarov Z. K. *Morskoye volneniye i yego prognozirovaniye* [Sea Waves and Its Forecasting]. *Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ.*, 1981, 166 p. (In Russ.)
11. Mikhailov V. N., Pyko N. S., Bogachev M. I., Kutuzov V. M. Fluctuation Analysis of Sea Surface Models. *Vestnik NovSU*. 2023, vol. 130, no. 1, pp. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145
12. Massel S. R. *Ocean Surface Wave: Their Physics and Prediction*. World Scientific Publishing, 1996, 491 p.
13. Pyko N. S., Orandarenko E. D., Bogachev M. I. Statistical Analysis of Local Extrema in Rough Sea Sur-faces Based on Computer Simulation. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111 (In Russ.)
14. 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, no. 24, pp. 5181–5190.
15. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E. et al. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Hamburg, Deutsches Hydrographisches Institute*, 1973, 95 p.
16. Rodriguez O. C., Silva A. J., Gomes J. P., Jesus S. M. Modeling Arrival Scattering Due to Surface Roughness. *Proc. of the 10th European Conf. on Underwater Acoustics*, Istanbul, Turkey, 5–9 July 2010. P. 1–8.

Information about the authors

Kirill Yu. Laptev, Master in Infocommunication Technology and Communications Systems (2024), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

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

E-mail: kirikill76@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2110-0568>

Nikita V. Sokolov, Specialist in "Radioelectronic systems and complexes" (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University). Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

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

E-mail: falconsnv@yandex.ru

Viacheslav N. Mikhailov, Enginer in Radiotechnics (2000), Senior Researcher of the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; mathematical modeling.

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

E-mail: vnmikhaylov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8155-9310>

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

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

E-mail: rogex@yandex.com

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

Evgenii N. Vorobev, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Senior Researcher at the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: passive radar; recognition of radar targets.

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

E-mail: envorobev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

Плоские диэлектрические волноводы терагерцового диапазона и дифракционные антенны на их основе

И. Г. Мироненко, С. С. Соколов, А. А. Иванов✉

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

✉ aai2@yandex.ru

Аннотация

Введение. Существующие средства САПР электродинамического моделирования, применяемые для анализа сложных волноведущих структур СВЧ-диапазона, используют метод конечных элементов. Однако в области терагерцового диапазона определение канализирующих свойств слоистых диэлектрических волноводов становится сложной задачей. В первую очередь это связано с построением сетки разбиения слоистой структуры с учетом особенностей, накладываемых на поведение электромагнитного поля на границах сред с различной относительной диэлектрической проницаемостью. В данной статье использована идея метода конечных элементов для решения задачи поиска постоянной распространения в плоском многослойном диэлектрическом волноводе и показано как уменьшить количество элементов при задании оптимальных граничных условий. На основе полученной расчетной модели рассмотрена возможность построения дифракционных антенн, работающих в терагерцовом диапазоне.

Цель работы. Построение вычислительной модели расчета плоского диэлектрического волновода методом конечных элементов, определение дисперсионных характеристик анализируемой структуры в терагерцовом диапазоне частот (ТГц). Обсуждение вопроса построения дифракционной антенны на диэлектрической структуре в различном конструктивном исполнении.

Материалы и методы. Вычислительная математическая модель для анализа сложной слоистой структуры выполнена на базе уравнений Максвелла и метода конечных элементов с применением граничных условий для касательных и нормальных компонент электромагнитного поля.

Результаты. Проведен численный анализ дисперсионных характеристик структур со сложным диэлектрическим заполнением, рассмотрены варианты дифракционных антенн для применения в ТГц-диапазоне.

Заключение. Созданные математические модели позволили численно оценить канализирующие свойства диэлектрических структур в терагерцовом диапазоне, на основе которых возможно построение дифракционных антенн.

Ключевые слова: метод конечных элементов, канализирующие диэлектрические структуры, линейные диэлектрики, дифракционные антенны

Для цитирования: Мироненко И. Г., Соколов С. С., Иванов А. А. Плоские диэлектрические волноводы терагерцового диапазона и дифракционные антенны на их основе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 54–64. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-54-64

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.06.2024; принята к публикации после рецензирования 06.08.2024; опубликована онлайн 29.11.2024

Flat Dielectric Waveguides of the Terahertz Range and Diffraction Antennas on Their Basis

Igor G. Mironenko, Sergey S. Sokolov, Arkady A. Ivanov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

Abstract

Introduction. The existing CAD tools of electrodynamic modeling used to analyze complex waveguide structures of the microwave range employ the finite element method. However, in the terahertz range, determining the channeling properties of layered dielectric waveguides becomes a difficult task. This is primarily related to the construction of a partition grid of the layered structure and the need to take into account the behavior of the electromagnetic field at the boundaries of media with different relative permittivity. In this work, we use the principles of the finite element method to solve the problem of finding a propagation constant in a flat multilayer dielectric waveguide, and show how to reduce the number of elements when setting optimal boundary conditions. Based on the obtained computational model, the possibility of constructing diffraction antennas operating in the THz range is considered.

Aim. Construction of a computational model for calculating a flat dielectric waveguide by the finite element method, determination of the dispersion characteristics of the analyzed structure in the THz range. Discussion of the possibility of constructing a diffraction antenna on a dielectric structure in various designs.

Materials and methods. A computational mathematical model for the analysis of a complex layered structure is based on Maxwell's equations and the finite element method using boundary conditions for tangential and normal components of the electromagnetic field.

Results. A numerical analysis of the dispersion characteristics of structures with complex dielectric filling is carried out; variants of diffraction antennas for use in the THz range are considered.

Conclusion. The created mathematical models made it possible to numerically evaluate the channeling properties of dielectric structures in the THz range, on the basis of which diffraction antennas can be constructed.

Keywords: finite element method, channeling dielectric structures, linear dielectrics, diffraction antennas

For citation: Mironenko I. G., Sokolov S. S., Ivanov A. A. Flat Dielectric Waveguides of the Terahertz Range and Diffraction Antennas on Their Basis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 54–64. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-54-64

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

Submitted 30.06.2024; accepted 06.08.2024; published online 29.11.2024

Введение. Современные средства САПР позволяют успешно выполнять расчеты сложных волноведущих структур в широком частотном диапазоне. Для решения задач практически все программные комплексы используют метод конечных элементов, сущность которого заключается в численном решении дифференциальных уравнений с частными производными. Дифференциальные уравнения решаются в выбранной области, разбиваемой на конечное число элементов, в каждом из которых задается аппроксимирующая функция. Границы элементов разбиения

связаны между собой узлами. За границами каждого элемента аппроксимирующая функция равна нулю, поэтому значения функций ищутся на границах элементов, т. е. в узлах. Таким образом, равенство функций соседних элементов в узле позволяет определить коэффициенты разложения аппроксимирующей функции (являющейся, как правило, полиномом первой степени). Далее составляется система линейных алгебраических уравнений, число элементов которой равно числу неизвестных в узлах. А так как элементы разбиения связаны только через узлы, то система ли-

нейных алгебраических уравнений содержит большое количество нулей и по своему виду является разряженной. Приравняв определитель матрицы системы линейных алгебраических уравнений к нулю, можно найти ее максимальный корень, а затем и неизвестные коэффициенты разложения. В области терагерцового диапазона построение сетки разбиения слоистой диэлектрической структуры с учетом поведения электромагнитного поля на границах – сложная задача. Как правило существующие автоматизированные средства проектирования не позволяют анализировать структуры в ТГц-диапазоне. Поэтому рассмотренные в статье соображения по использованию данного метода с учетом правильного применения граничных условий позволят разработчикам рассчитать характеристики исследуемых канализирующих структур.

Предварительные замечания. Плоские диэлектрические волноводы терагерцового диапазона объединяют общие конструктивные и технологические черты, позволяющие строить рас-

чет постоянной распространения канализируемых электромагнитных волн с общих позиций. На рис. 1, а–г показаны поперечные сечения волноводов, волноведущие свойства которых определяются канализацией электромагнитных волн вокруг прямоугольного диэлектрического стержня, чье значение относительной диэлектрической проницаемости ε_2 больше, чем у окружающего его диэлектрика с ε_1 ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$). Волноводы выполнены по кремниевой технологии [1], поэтому $\varepsilon_2 = 4 \dots 12$, $\varepsilon_1 \cong 2$ [2].

Канализация волн вокруг диэлектрического стержня позволяет считать границу с кремниевой подложкой непроницаемой для поля, а поперечные сечения волновода – условно безграничными. На рис. 1, г показано поперечное сечение диэлектрического волновода, в котором волноведущая область образована двумя проводящими слоями кремния.

Векторы напряженности электрического и магнитного полей канализируемых волн в со-

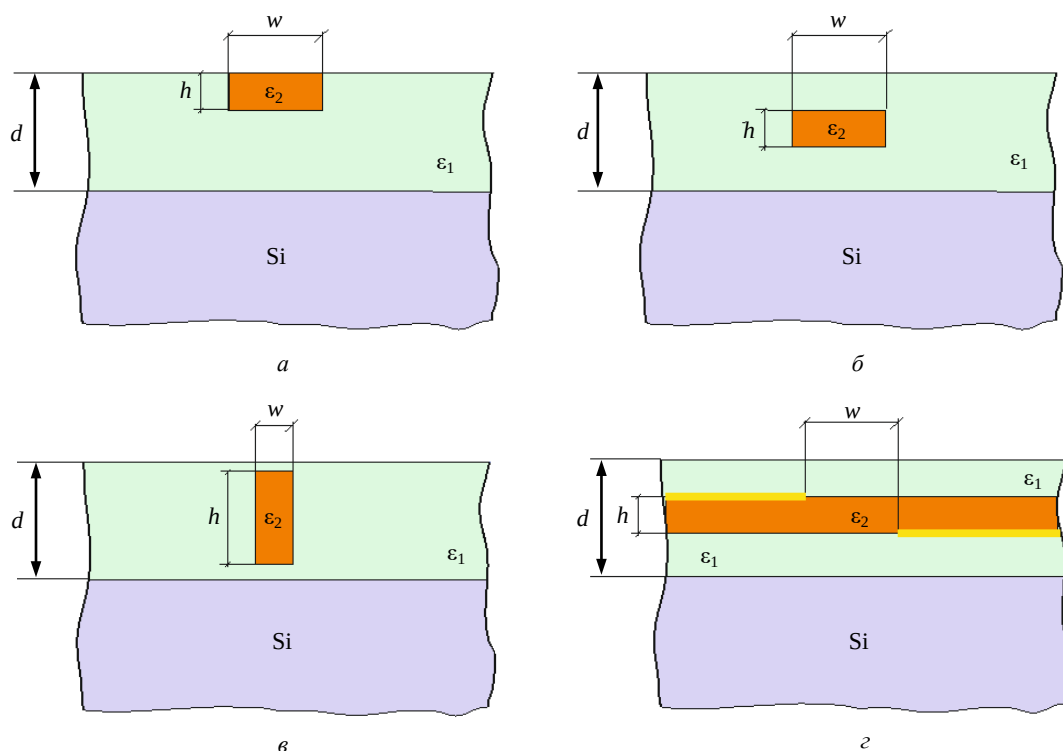


Рис. 1. Поперечные сечения волноводов: а – слой с ε_2 расположен у поверхности диэлектрика с ε_1 ; б – слой с ε_2 расположен горизонтально в диэлектрике с ε_1 ; в – слой с ε_2 расположен вертикально в диэлектрике с ε_1 ; г – слой с ε_2 расположен между двумя металлическими электродами, интегрированными в слой с ε_1

Fig. 1. Cross sections of waveguides: а – the layer with ε_2 is located at the surface of the dielectric with ε_1 ; б – the layer with ε_2 is located horizontally in the dielectric with ε_1 ; в – the layer with ε_2 is located vertically in the dielectric with ε_1 ; г – The layer with ε_2 is located between two metal electrodes integrated into the layer with ε_1

ответствии с цилиндрической симметрией плоских волноводов и гармонической временной зависимостью можно представить в виде

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}(x, y)e^{j(\omega t - \gamma z)}; \\ \dot{\mathbf{H}} &= \mathbf{H}(x, y)e^{j(\omega t - \gamma z)},\end{aligned}\quad (1)$$

где x, y – координаты поперечного сечения; $\omega = 2\pi f$; f – частота; γ – постоянная распространения; z – ось распространения.

Канализируемые волны по принятой классификации можно отнести к гибридным волнам:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{E}}(x, y) &= \mathbf{e}_x E_x(x, y) + \mathbf{e}_y E_y(x, y) + \mathbf{e}_z E_z(x, y); \\ \dot{\mathbf{H}}(x, y) &= \mathbf{e}_x H_x(x, y) + \mathbf{e}_y H_y(x, y) + \mathbf{e}_z H_z(x, y),\end{aligned}\quad (2)$$

где $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ – орты декартовой системы координат.

Уравнения Максвелла для полей в виде (1), (2) можно преобразовать к дифференциальному уравнению относительно вектора $\dot{\mathbf{E}}(x, y)$:

$$\hat{L}\dot{\mathbf{E}}(x, y) = 0, \quad (3)$$

где $\hat{L} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \chi^2$ – дифференциальный

оператор; $\chi^2 = k_0^2 \varepsilon(x, y) - \gamma^2$; $\varepsilon(x, y)$ – функция распределения диэлектрической проницаемости на поперечном сечении диэлектрических волноводов; $k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-10} \frac{\text{Гн}}{\text{мм}}$;

$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Ф}}{\text{мм}}.$$

Решать уравнение (3) в неограниченной области поперечного сечения диэлектрических

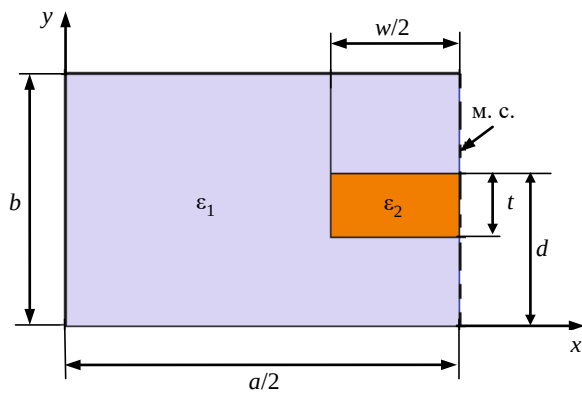


Рис. 2. Поперечное сечение волновода в прямоугольной системе координат

Fig. 2. The cross section of the waveguide in a rectangular coordinate system

волноводов бессмысленно, так как у реальных волноводов поперечное сечение ограничено. В связи с этим логично окружить поперечное сечение диэлектрических волноводов виртуальной конечной прямоугольной областью. Основным тип волны в полученных волноводах симметричен по оси x относительно плоскости, в которой электромагнитное поле максимально. Именно поэтому плоскость симметрии должна быть идеальной магнитной стенкой (м. с.). На идеальной магнитной стенке продольная составляющая электрического поля $E_z(x, y)$ и поперечная составляющая $E_y(x, y)$, как касательные к идеальной магнитной стенке, максимальны, а $E_x(x, y) = 0$, как нормальная составляющая к магнитной стенке. Остальные 3 стороны прямоугольной области удобно выбрать идеальными металлическими, на которых касательные составляющие электрического поля равны нулю. Границы области при $a \gg \lambda$, $b \gg \lambda$ не будут существенно влиять на постоянную распространения и на распределение поля вокруг диэлектрической области с ε_2 при канализации электромагнитной энергии в диэлектрических волноводах. Таким образом, конечная вспомогательная прямоугольная область выступает как модель для расчета волн основного типа в диэлектрическом волноводе. На рис. 2 представлено поперечное сечение прямоугольного волновода, в известной мере эквивалентного плоским волноводам, показанным на рис. 1, а–в. Нижняя стенка волновода (рис. 2) располагается вдоль границы с кремни-

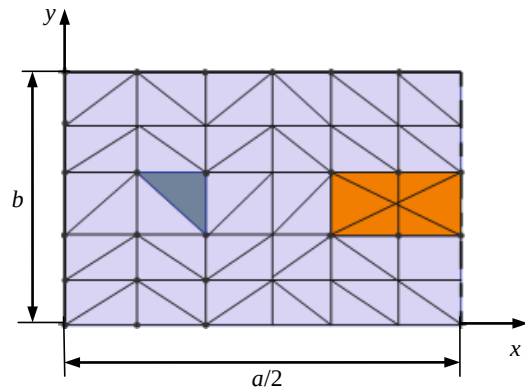


Рис. 3. Условная схема разбиения области решения

Fig. 3. A conditional scheme for dividing the solution area

своей подложкой (рис. 1), функция $\varepsilon(x, y)$ может быть легко описана для конкретного диэлектрического волновода.

Общие соображения по методу расчета. В описываемой работе в качестве метода расчета постоянной распространения в диэлектрических волноводах выбран метод конечных элементов. Уравнение (3) в проекциях на оси координат отвечает трем скалярным уравнениям относительно трех компонент напряженности электрического поля. Обозначив через вектор $\varphi(x, y)$ любую из них, уравнение (3) можно представить в эквивалентной скалярной форме

$$\hat{L}\varphi(x, y) = 0. \quad (4)$$

Уравнению (4) отвечает вариационный функционал $\Phi(\varphi)$ [3–6]:

$$\Phi(\varphi) = \frac{1}{2} \int_s \left[\left(\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right)^2 - \chi^2 \varphi(x, y) \right] ds, \quad (5)$$

который принимает минимальное значение на решении уравнения (4). Функцию $\varphi(x, y)$ удобно аппроксимировать на большом числе малых треугольных элементов, на которые разбивается область решения уравнения (4). На рис. 3 представлена условная схема разбиения поперечного сечения эквивалентного волновода (рис. 2). На рис. 4 показан один произвольно выбранный элемент разбиения (e) из множества. Вершины элемента на рис. 4 обозначены в локальной системе нумерации как i , j , m .

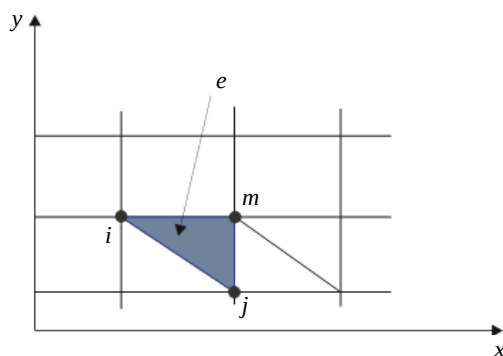


Рис. 4. Произвольный элемент разбиения
Fig. 4. An arbitrary partition element

В вершинах выделенного элемента определены значения скалярной функции $\varphi_i^{(e)}, \varphi_j^{(e)}, \varphi_m^{(e)}$, которые в методе конечных элементов называют узловыми потенциалами. Их точные значения определяются решением уравнения (4) при известных координатах вершин элемента: $x_i y_i, x_j y_j, x_m y_m$. В случае приближенного решения значения узловых потенциалов могут быть аппроксимированы линейным многочленом

$$\varphi^{(e)}(x, y) = a + bx + cy. \quad (6)$$

Коэффициенты многочлена (6) в свою очередь определяются через значения узловых потенциалов. В [4] показано, что соотношение (6) может быть приведено к виду

$$\varphi^{(e)}(x, y) = \varphi_i^{(e)} \alpha_i^{(e)} + \varphi_j^{(e)} \alpha_j^{(e)} + \varphi_m^{(e)} \alpha_m^{(e)}, \quad (7)$$

где $\alpha_i^{(e)} = \frac{1}{2S^{(e)}}(a_i^{(e)} + b_i^{(e)}x + c_i^{(e)}y)$; $\alpha_j^{(e)} = \frac{1}{2S^{(e)}}(a_j^{(e)} + b_j^{(e)}x + c_j^{(e)}y)$; $\alpha_m^{(e)} = \frac{1}{2S^{(e)}}(a_m^{(e)} + b_m^{(e)}x + c_m^{(e)}y)$; $a_i^{(e)}, b_i^{(e)}, c_i^{(e)}, a_j^{(e)}, b_j^{(e)}, c_j^{(e)}, a_m^{(e)}, b_m^{(e)}, c_m^{(e)}$ – вспомогательные параметры, вычисленные через координаты вершин элемента; $a_i = x_i y_m - x_m y_j$, $b_i = y_j - y_m$, $c_i = x_m - x_j$; $a_j, a_m, b_j, b_m, c_j, c_m$ – подчиняются правилу круговой перестановки; $S^{(e)} = \frac{1}{2}[x_i(y_j - y_m) + x_j(y_m - y_i) + x_m(y_i - y_j)]$ – площадь элемента, если i, j, m расположены против часовой стрелки.

Найдем вид функционала $\Phi(\varphi)$ на выделенном элементе. Подставив в (5) соотношение (7) и выполнив необходимые действия, получим

$$\begin{aligned} \Phi^{(e)} = & \frac{1}{8S^{(e)}} \left[\left(\varphi_i^{(e)} b_i^{(e)} + \varphi_j^{(e)} b_j^{(e)} + \varphi_m^{(e)} b_m^{(e)} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left(\varphi_i^{(e)} c_i^{(e)} + \varphi_j^{(e)} c_j^{(e)} + \varphi_m^{(e)} c_m^{(e)} \right)^2 \right] - \\ & - \frac{\chi^2}{2} \int_{S^e} \left(\varphi_i^{(e)} \alpha_i^{(e)} + \varphi_j^{(e)} \alpha_j^{(e)} + \varphi_m^{(e)} \alpha_m^{(e)} \right) ds. \quad (8) \end{aligned}$$

Функционал (8) является и функцией трех узловых потенциалов $\varphi_i^{(e)}$, $\varphi_j^{(e)}$, $\varphi_m^{(e)}$.

Найдем производные $\frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_i^{(e)}}$, $\frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_j^{(e)}}$, $\frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_m^{(e)}}$ и представим их в виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_i^{(e)}} &= a_{11}^{(e)} \varphi_i^{(e)} + a_{12}^{(e)} \varphi_j^{(e)} + a_{13}^{(e)} \varphi_m^{(e)}; \\ \frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_j^{(e)}} &= a_{12}^{(e)} \varphi_i^{(e)} + a_{22}^{(e)} \varphi_j^{(e)} + a_{23}^{(e)} \varphi_m^{(e)}; \\ \frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_m^{(e)}} &= a_{13}^{(e)} \varphi_i^{(e)} + a_{23}^{(e)} \varphi_j^{(e)} + a_{33}^{(e)} \varphi_m^{(e)},\end{aligned}\quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}a_{11}^{(e)} &= \frac{b_i^2 + c_i^2}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{6}; \\ a_{12}^{(e)} &= \frac{b_i b_j + c_i c_j}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{12}; \\ a_{13}^{(e)} &= \frac{b_i b_m + c_i c_m}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{12}; \\ a_{22}^{(e)} &= \frac{b_j^2 + c_j^2}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{6}; \\ a_{23}^{(e)} &= \frac{b_j b_m + c_j c_m}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{12}; \\ a_{33}^{(e)} &= \frac{b_m^2 + c_m^2}{4S^{(e)}} - \frac{\chi^{2(e)} S^{(e)}}{6}.\end{aligned}\quad (10)$$

Все члены соотношений (9) и (10) являются только функциями координат вершин треугольного элемента и элементарно вычисляются. Значение $\chi^{(e)}$ зависит от диэлектрической проницаемости среды, в которой находится выделенный элемент. Таким образом, для отдельного элемента построен алгоритм отыскания узловых потенциалов, доставляющий минимум вариационному функционалу (8). На всей прямоугольной области решения уравнения (4) вариационный функционал является суммой функционалов отдельных элементов $\Phi = \sum_{e=1, 2}^M \Phi^{(e)}$.

В этом соотношении естественно должна быть принята сквозная нумерация узловых потенциалов в вершинах треугольных элементов. Она произвольна. Поэтому каждому номеру "p" вершины элемента в сквозной нумерации должен быть соотнесен узловой потенциал φ_p и установлено его соответствие с узловыми потенциалами в локальной системе координат $\varphi_i^{(e)}$, $\varphi_j^{(e)}$, $\varphi_m^{(e)}$. Вариационный функционал Φ является функцией всех узловых потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_p, \dots, \varphi_M$ как независимых переменных, поэтому для отыскания его минимума нужно обнулить производные по узловым потенциалам, что приводит к системе уравнений относительно узловых потенциалов в сквозной нумерации

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_p} = \sum_{e=1, 2, \dots}^M \frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_p} = 0. \quad (11)$$

В (11) ненулевые слагаемые в сумме возникают только от тех элементов разбиения, которые содержат p-й узел. Система линейных алгебраических уравнений (11) однородна, поэтому ее определитель должен быть равен нулю. Обнуление определителя дает искомое значение постоянной распространения.

Алгоритм построения системы алгебраических уравнений. На рис. 5 представлен фрагмент разбиения области решения уравнения (4). В качестве скалярного потенциала выбрана продольная составляющая электрического поля $\varphi(x, y) = E_z(x, y)$. На рис. 5 показано расположение и пронумерованы узловые потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$ и элементы разбиения (номера в кружках) в произвольной сквозной нумерации. На металлических границах $\varphi(x, y) = 0$, поэтому на них узловые потенциалы при построении системы уравнений должны быть отброшены. Вершины каждого элемента разбиения на рис. 5 обозначены как i, j, m в произвольной последовательности с тем условием, что обход вершин отвечает движению против часовой стрелки. Каждому узловому потенциалу с номером "p" на каждом элементе соответствует номер локальной нумерации.

Алгоритм построения одного уравнения покажем на примере рис. 5. Выберем узел с номе-

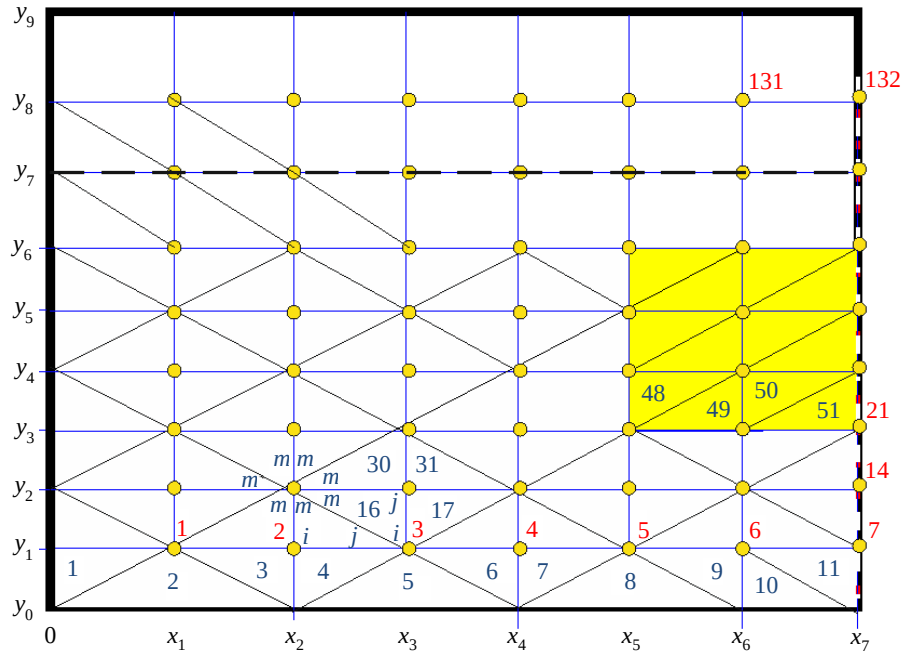


Рис. 5. Фрагмент разбиения области решения

Fig. 5. A fragment of the division of the solution area

ром $p = 10$, отвечающий ему узловой потенциал Φ_{10} расположен в вершинах элементов 16, 17, 30, 31. Поэтому уравнение для $p = 10$ в системе уравнений (11) можно представить в виде

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{10}} = \frac{\partial \Phi^{(16)}}{\partial \Phi_{10}} + \frac{\partial \Phi^{(17)}}{\partial \Phi_{10}} + \frac{\partial \Phi^{(30)}}{\partial \Phi_{10}} + \frac{\partial \Phi^{(31)}}{\partial \Phi_{10}}. \quad (12)$$

Номерам вершин элемента разбиения $e = 16$ в локальной нумерации i, j, m соответствуют номера узловых потенциалов в сквозной нумерации на рис. 5: $i = p = 3; j = p = 10; m = p = 9$. Аналогично для элемента $e = 17$: $i = p = 3; j = p = 11; m = p = 10$; для элемента $e = 30$: $i = p = 10; j = p = 17; m = p = 9$; для элемента $e = 31$: $i = p = 17; j = p = 10; m = p = 11$. Программой расчета установлены соответствия номеров вершин каждого элемента разбиения в локальной и сквозной нумерациях и номера узловых потенциалов [7–18]. Поэтому производные в (12) легко вычисляются с помощью соотношения (9):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{10}} = & a_{12}^{(16)} \Phi_3 + a_{22}^{(16)} \Phi_{10} + a_{23}^{(16)} \Phi_9 + \\ & + a_{13}^{(17)} \Phi_3 + a_{11}^{(17)} \Phi_{11} + a_{33}^{(17)} \Phi_{10} + \\ & + a_{11}^{(30)} \Phi_{10} + a_{12}^{(30)} \Phi_{17} + a_{13}^{(30)} \Phi_9 + \\ & + a_{12}^{(31)} \Phi_{17} + a_{22}^{(31)} \Phi_{10} + a_{23}^{(31)} \Phi_{11}. \end{aligned}$$

После приведения подобных получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{10}} = & (a_{12}^{(16)} + a_{13}^{(17)}) \Phi_3 + (a_{23}^{(16)} + a_{13}^{(30)}) \Phi_9 + \\ & + (a_{11}^{(30)} + a_{22}^{(31)} + a_{22}^{(16)} + a_{33}^{(17)}) \Phi_{10} + \\ & + (a_{11}^{(17)} + a_{23}^{(31)}) \Phi_{11} + (a_{12}^{(30)} + a_{12}^{(31)}) \Phi_{17}. \quad (13) \end{aligned}$$

Полученному соотношению естественно придать матричную форму записи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{10}} = & f_{10,3} \Phi_3 + f_{10,9} \Phi_9 + f_{10,10} \Phi_{10} + \\ & + f_{10,11} \Phi_{11} + f_{10,17} \Phi_{17}. \quad (14) \end{aligned}$$

В соотношении (14) выражения для $f_{10,3}, f_{10,9} \dots$ очевидно следуют из (13). Кроме того матрица элементов системы уравнений (12) симметрична, поэтому недиагональные элементы матрицы равны попарно: $f_{10,3} = f_{3,10}; f_{10,9} = f_{9,10}$.

Таким образом, определитель матрицы системы уравнений (12) строится по предложенному алгоритму: по соответствию номеров сквозной и локальной нумераций строятся соотношения для производных вариационного функционала (11) на основании соотношений (9) и (10). Искомое значение постоянной рас-

пространения находится как максимальный корень системы уравнений (12).

Результаты расчетов. На рис. 6–9 представлены расчеты постоянной распространения волн основного типа в диэлектрических волноводах на частоте $197 \cdot 10^{12}$ Гц. Число узловых потенциалов в программе расчета было одинаковым и равным 132, поэтому можно ожидать, что точность численных значений постоянной распространения будет высокой.

На рис. 1, z волноведущая область образована двумя плоскими проводящими слоями. При перекрытии проводящих слоев $\Delta \leq 0$, очевидно, возникает недопустимо большое затухание в электродах. При $\Delta > 0$ (рис. 1, z) волноведущая область, образованная двумя проводящими слоями, канализирует поле, предполагаемые омические потери которого могут быть приемлемыми.

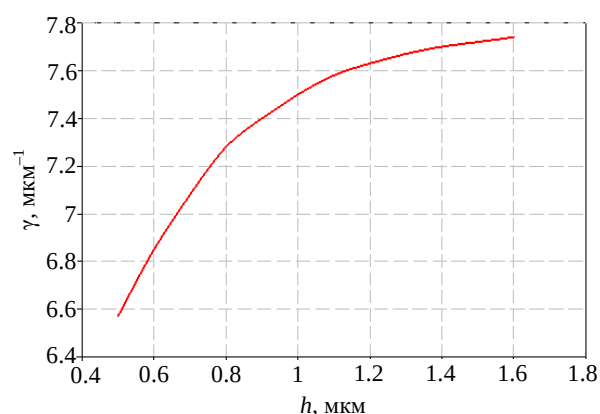


Рис. 6. Зависимость постоянной распространения от h для структуры на рис. 1, a : $\varepsilon_2 = 4$, $w = 1.5$ мкм, $d = 3$ мкм

Fig. 6. The dependence of the propagation constant on h for the structure of Fig. 1, a : $\varepsilon_2 = 4$, $w = 1.5$ μm, $d = 3$ μm

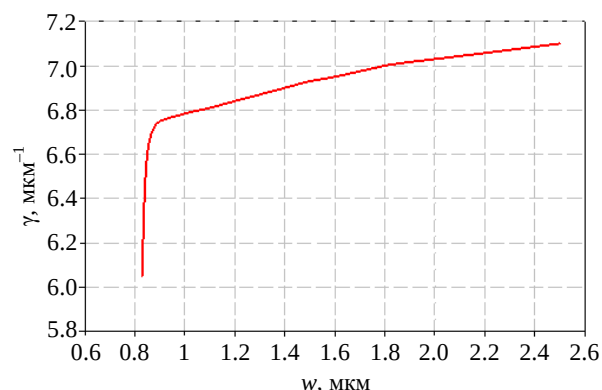


Рис. 7. Зависимость постоянной распространения от w для структуры на рис. 1, b : $\varepsilon_1 = 1.96$, $\varepsilon_2 = 4$, $h = 0.6$ мкм, $d = 3$ мкм

Fig. 7. The dependence of the propagation constant on w for the structure of Fig. 1, b : $\varepsilon_1 = 1.96$, $\varepsilon_2 = 4$, $h = 0.6$ μm, $d = 3$ μm

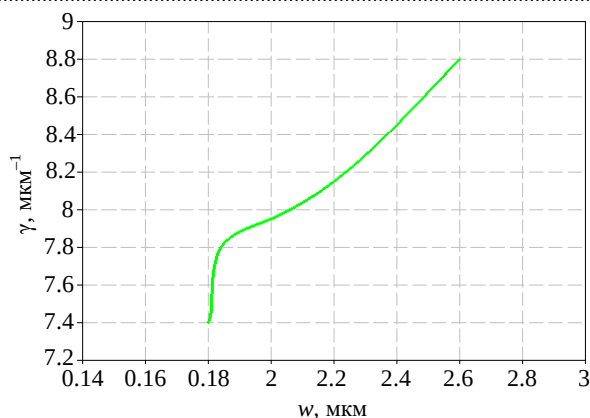


Рис. 8. Зависимость постоянной распространения от w для структуры на рис. 1, $в$: $\varepsilon_1 = 2.08$, $\varepsilon_2 = 12.06$, $h = 0.5$ мкм, $d = 1.5$ мкм

Fig. 8. The dependence of the propagation constant on w for the structure of Fig. 1, $в$: $\varepsilon_1 = 2.08$, $\varepsilon_2 = 12.06$, $h = 0.5$ μm, $d = 1.5$ μm

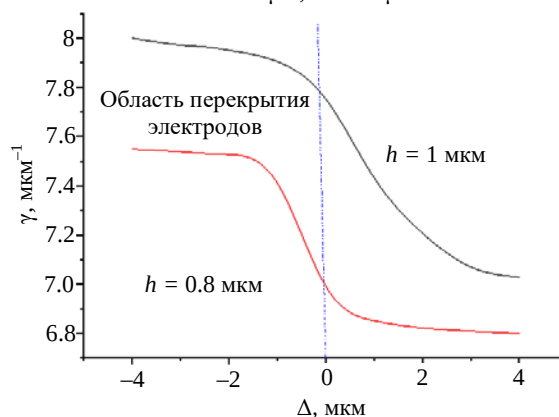


Рис. 9. Зависимость постоянной распространения от Δ для структуры на рис. 1, $г$: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1.96$, $\varepsilon_2 = 4$, $d = 3$ мкм

Fig. 9. The dependence of the propagation constant on Δ for the structure of Fig. 1, $г$: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1.96$, $\varepsilon_2 = 4$, $d = 3$ μm

Дифракционные антенны на основе диэлектрических волноводов. На основе рассмотренных диэлектрических волноводов могут быть построены антенны дифракционного типа с выводом энергии в свободное пространство. На рис. 10 представлена схема подобной антенны, образованной периодической системой электродов с шагом τ над диэлектрическим волноводом. На рис. 11 представлена схема антенны с периодической системой щелей в электродах диэлектрического волновода (см. рис. 1, $г$).

Из теории дифракционных решеток известно, что при волновом векторе решетки $k = 2\pi/\tau$ (не равном постоянной распространения волны в диэлектрическом волноводе) дифракционное рассеяние электромагнитных волн имеет многопестиковый характер, угловое положение максимумов которых определяется соотношением

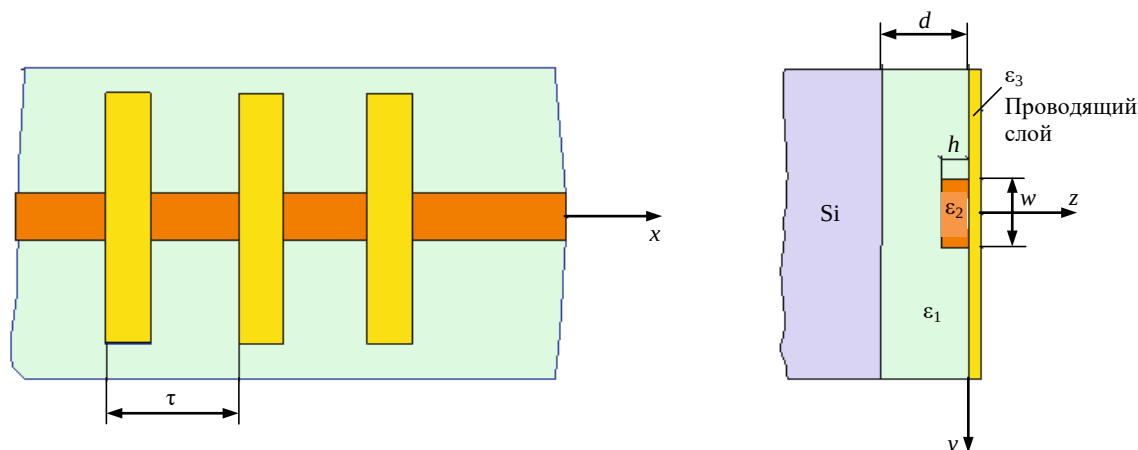


Рис. 10. Схема дифракционной антенны с периодической системой электродов

Fig. 10. Diagram of a diffraction antenna with a periodic electrode system

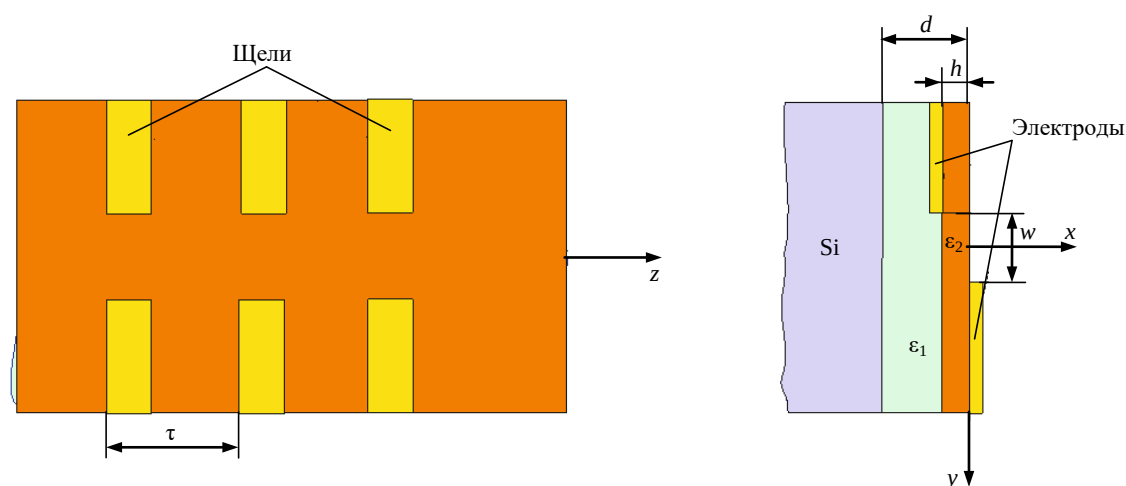


Рис. 11. Схема дифракционной антенны с периодической структурой щелей

Fig. 11. The scheme of a diffraction antenna with a periodic slit structure

$$\frac{k\tau}{2} \left(\frac{\gamma}{k_0} - \sin(\alpha_{\max}) \right) = m\pi, \quad (15)$$

где $\alpha_{\max}$ – угол между нормалью к поверхности решетки и направлением максимального излучения m -го лепестка.

Значение $\alpha_{\max}$, отвечающее основному дифракционному лепестку, соответствует $m = 1$. Поэтому из (15) следует, что значение угла максимального излучения основного дифракционного лепестка

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{\gamma}{k_0} - \frac{\lambda}{\tau} \right).$$

Очевидно, выбором шага решетки τ при сохранении $\left(\frac{\gamma}{k_0} - \frac{\lambda}{\tau} \right) < 1$ можно обеспечить

желаемый угол излучения. Допустим, $\alpha_{\max}$ лежит в диапазоне углов $\pm \pi/2$. Тогда максимальное отклонение излучения в сторону отрицательных углов к положению нормали к поверхности решетки отвечает соотношению $\left(\frac{\gamma}{k_0} - \frac{\lambda}{\tau} \right) \cong -1$, а в сторону положительных углов $\left(\frac{\gamma}{k_0} - \frac{\lambda}{\tau} \right) \cong 1$. Эта пара соотношений определяет пределы замедления волны γ/k_0 в волноводе при произвольном $\alpha_{\max}$ в пределах полусферы

$$\left(\frac{\lambda}{\tau} - 1 \right) < \frac{\gamma}{k_0} < \left(\frac{\lambda}{\tau} + 1 \right). \quad (16)$$

Отсюда следует, что шаг решетки не может быть больше половины длины в свободном

пространстве. Из результатов расчетов можно сделать вывод, что выбором размеров и значений диэлектрических проницаемостей диэлектрических волноводов всегда можно найти требуемое замедление, отвечающее (16).

Например, из рис. 8 следует, что при $h = 0.5$ мкм, $w = 0.21$ мкм значение $\gamma/k_0 \cong 2$. Тогда при $\tau = 0.4$ неравенство (16) удовлетворяется при $\alpha_{\max} = -\pi/3$.

Заключение. На данный момент существуют специализированные САПР для анализа множества различных методов расчета электрофизических характеристик диэлектриков в СВЧ-диапазоне, однако не все они применимы для ком-

бинированных структур, состоящих из различных слоев диэлектриков, которые могут существенно различаться как толщиной, так и диэлектрической проницаемостью. Представленный метод конечных элементов для расчета сложной диэлектрической структуры позволяет численно оценить ее характеристики в терагерцовом диапазоне частот, а для разработчиков и производителей высокочастотной техники в субмикроволновом диапазоне длин волн – проектировать элементы с требуемыми техническими характеристиками. Рассмотренные варианты дифракционных антенн на анализируемой структуре могут найти широкое практическое применение.

Список литературы

1. Schwartz G. C., Srikrishnan K. V. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 536 p.
2. Зи С., Чистяков Ю. Д. Технология СБИС: в 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 404 с; Т. 2. 453 с.
3. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. 536 с.
4. Гринев А. Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2012. 336 с.
5. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. М.: Мир, 1985. 590 с.
6. Никольский В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.
7. Деклу Ж. Метод конечных элементов / пер. с франц. М.: Мир, 1976. 95 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
9. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / пер. с англ. М.: Мир, 1986. 318 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 С.
11. CALFEM: A Finite Element Toolbox. Ver. 3.4 / P. Austrell, O. Dahlblom, J. Lindemann, A. Olsson, K.-G. Olsson, K. Persson, H. Pettersson, M. Ristinmaa,

- G. Sandberg, P.-A. Wernberg. Sweden: Structural Mechanics, LTH, 2004. 285 p.
12. Hutton D. V. Fundamentals of Finite Element Analysis. 1st ed. New York: McGraw Hill, 2003. 640 p.
13. Le K. H. Finite Element Mesh Generation Methods: A Review and Classification // Computer-Aided Design. 1988. Vol. 20, iss. 1. P. 27–38. doi: 10.1016/0010-4485(88)90138-8
14. Moaveni S. Engineering Fundamentals: An Introduction to Engineering. 3th ed. Toronto: Thomson Learning, 2008. 634 p.
15. Schäfer M. Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 321 p. doi: 10.1007/3-540-30686-2
16. Stasa F. L. Applied Finite Element Analysis for Engineers. New York: CBS Publishing, 1985. 659 p.
17. On the Numerical Solution of Two- Dimensional Potencial Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method / G. F. Fairweather, J. Rizzo, D. J. Shippy, Y. S. Wu // J. Computational Phisics. 1979. Vol. 31, iss. 1. P. 96–112. doi: 10.1016/0021-9991(79)90064-0
18. Frey P. J., George P.-L. Mesh Generation. Application to Finite Elements. 2nd ed. London: ISTE Publishing Company, 2008. 814 p. doi: 10.1002/9780470611166

Информация об авторах

Мироненко Игорь Германович – доктор технических наук (1979), профессор (1981) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук (1993), профессор (1995) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона.

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

Иванов Аркадий Анатольевич – доктор технических наук (2018), профессор (2020) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aai2@yandex.ru

References

1. Schwartz G. C., Srikrishnan K. V. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2006, 536 p.
2. Zi S., Chistyakov Yu. D. *Tekhnologiya SBIS* [ULITC Technology]. Moscow, Mir, 1986, vol. 1, 404 p.; vol. 2, 453 p. (In Russ.)
3. Marchuk G. I. *Metody vychislitel'noi matematiki* [Methods of Computational Mathematics]. Moscow, Nauka, 1980, 536 p. (In Russ.)
4. Grinev A. Yu. *Chislennye metody resheniya prikladnykh zadach elektrodinamik* [Numerical Methods for Solving Applied Problems of Electrodynamics. Textbook]. Moscow, Radio engineering, 2012, 336 p. (In Russ.)
5. Rektorys K. Variational Methods in Mathematics, Science and Engineering. Berlin, Springer, 1977, 571 p.
6. Nikolsky V. V. *Variatsionnye metody dlya vnutrennykh zadach elektrodinamiki* [Variational Methods for Internal Problems of Electrodynamics]. Moscow, Nauka, 1967, 460 p. (In Russ.)
7. Declou J. *Metod konechnykh elementov* [The Finite Element Method]. Trans. from French. Moscow, Mir, 1976, 95 p. (In Russ.)
8. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The Finite Element Method in Engineering]. Moscow, Mir, 1975, 541 p. (In Russ.)
9. Zienkiewicz O., Morgan K. Finite Elements and Approximation. New York, John Wiley & Sons, 1983, 328 p.
10. Segerlind L. Applied Finite Element Analysis. New York, John Wiley & Sons, 1976, 442 p.
11. Austrell P., Dahlblom O., Lindemann J., Olsson A., Olsson K.-G., Persson K., Pettersson H., Ristinmaa M., Sandberg G., Wernberg P.-A. CALFEM: A Finite Element Toolbox. Ver. 3.4. Sweden; Structural Mechanics, LTH, 2004, 285 p.
12. Hutton D. V. Fundamentals of Finite Element Analysis. 1st ed. New York, McGraw Hill, 2003, 640 p.
13. Le K. H. Finite Element Mesh Generation Methods: A Review and Classification. Computer-Aided Design. 1988, vol. 20, iss. 1, pp. 27–38. doi: 10.1016/0010-4485(88)90138-8
14. Moaveni S. Engineering Fundamentals: An Introduction to Engineering. 3th ed. Toronto, Thomson Learning, 2008, 634 p.
15. Schäfer M. Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 321 p. doi: 10.1007/3-540-30686-2
16. Stasa F. L. Applied Finite Element Analysis for Engineers. New York, CBS Publishing, 1985, 659 p.
17. Fairweather G. F., Rizzo J., Shiply D. J., Wu Y. S. On the Numerical Solution of Two-Dimensional Potential Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method. J. Computational Physics. 1979, vol. 31, iss. 1, pp. 96–112. doi: 10.1016/0021-9991(79)90064-0
18. Frey P. J., George P.-L. Mesh Generation. Application to Finite Elements. 2nd ed. London, ISTE Publishing Company, 2008, 814 p. doi: 10.1002/9780470611166

Information about the authors

Igor G. Mironenko, Dr Sci. (Eng.) (1979), Professor (1981) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

Sergey S. Sokolov, Dr Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: sovet@etu.ru

Arkady A. Ivanov, Dr Sci. (2018), Professor (2020) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aai2@yandex.ru

Взаимная синхронизация ансамблей спинтронных наноосцилляторов

Л. А. Цырульникова^{1,2✉}, Д. А. Фролов¹, А. Р. Сафин^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉ mila.tsyrulnikova@gmail.com

Аннотация

Введение. Использование спинтронной компонентной базы значительно повышает быстродействие, уменьшает размеры и снижает энергопотребление современных электронных устройств. Неотъемлемой частью спинтронных устройств является спинтронный осциллятор (СО). Связывание многих СО (> 100) в ансамбли с дальнейшей синхронизацией позволяет нивелировать такие недостатки СО, как малая выходная мощность и высокие фазовые шумы, так как выходная мощность ансамбля СО увеличивается в сравнении с единичным осциллятором, в то время как ширина спектральной линии ансамбля уменьшается.

Цель работы. Исследование влияния топологии связи, механизмов связи и отказов в работе СО на синхронизацию ансамбля осцилляторов.

Материалы и методы. Для упрощения численного моделирования синхронизации ансамбля N связанных СО была использована фазовая модель Курамото.

Результаты. Получено уравнение Курамото для фаз связанных в ансамбль СО, продемонстрировано влияние топологии связи и отказов в работе СО на параметры синхронизации ансамбля N связанных осцилляторов.

Заключение. Показано, что для наименьшего времени перехода ансамбля СО в синхронный режим предпочтительнее выбирать топологии с большим числом связей между осцилляторами (например, "все со всеми"). На основании полученных результатов сделан вывод о преимуществах локальной связи ансамбля СО общим током, обеспечивающей топологию ансамбля "все со всеми", благодаря чему время перехода ансамбля СО в синхронный режим наименее зависимо от отказов в работе осцилляторов и увеличения количества синхронизируемых СО.

Ключевые слова: спинтронный осциллятор, ансамбли спинтронных осцилляторов, синхронизация, модель Курамото, топология связи, отказ осциллятора, механизмы связи

Для цитирования: Цырульникова Л. А., Фролов Д. А., Сафин А. Р. Взаимная синхронизация ансамблей спинтронных наноосцилляторов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 65–76. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-65-76

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания РФ в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024; принята к публикации после рецензирования 21.10.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



Mutual Synchronization of Spintronic Nano-Oscillator Ensembles

Ludmila A. Tsyrlnikova^{1,2✉}, Daniil A. Frolov¹, Ansar R. Safin^{1,2}

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ mila.tsyrlnikova@gmail.com

Abstract

Introduction. The use of spintronic components significantly enhances the performance, reduces the size, and lowers the power consumption of modern electronic devices. The spintronic oscillator (SO) is an integral part of spintronic devices. Connecting several SOs (> 100) into ensembles with subsequent synchronization mitigates such SO drawbacks as low output power and high phase noise. These drawbacks appear as a result of an increase in the output power of an SO ensemble compared to a single oscillator under a simultaneous decrease in the spectral linewidth of the ensemble.

Aim. To investigate the impact of connection topologies, synchronization mechanisms, and oscillator failures on the synchronization of oscillator ensembles.

Materials and methods. The Kuramoto phase model was used to simplify the numerical modeling of synchronization of SOs connected into an ensemble.

Results. A Kuramoto equation for phases of SOs connected in an ensemble was derived, and the influence of connection topologies and oscillator failures on the synchronization parameters of an ensemble of N connected oscillators was demonstrated.

Conclusion. In order to ensure the shortest transition time of an SO ensemble to the synchronous mode, topologies with a higher number of connections between oscillators (e.g., "all-to-all") are preferable. The results obtained confirm the advantages of local connection of an SO ensemble by a common current, thus forming an "all-to-all" topology. This makes the transition time of the SO ensemble to the synchronous mode less dependent on both oscillator failures and the number of synchronized SOs.

Keywords: spintronic oscillator, spintronic oscillator ensembles, synchronization, Kuramoto model, connection topology, oscillator failure, synchronization mechanisms

For citation: Tsyrlnikova L. A., Frolov D. A., Safin A. R. Mutual Synchronization of Spintronic Nano-Oscillator Ensembles. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 65–76. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-65-76

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

Source of funding. The work was supported by the Russian Federation state assignment at the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS.

Submitted 26.08.2024; accepted 21.10.2024; published online 29.11.2024

Введение. Ужесточение требований к современным радиоэлектронным устройствам, таких, как миниатюризация, малое энергопотребление и быстроедействие, способствует активному внедрению радиоэлектронных элементов на базе спинтроники [1]. Перспективными элементами спинтронных структур являются спинтронные осцилляторы (СО), вызывающие интерес благодаря совокупности таких преимуществ, как миниатюрные размеры (десятки и сотни наномет-

ров), широкие возможности интеграции с существующей технологией КМОП [2], генерация СВЧ-колебаний с быстрой и широкополосной перестройкой током резонансной частоты [3, 4]. Перспективность СО подтверждается множеством работ по их возможным прикладным приложениям: магниторезистивная память на основе спинтронных вентилей [5], магнитные сенсоры и датчики [6], отдельные элементы системы фазовой синхронизации [7–9], нейро-

морфные сети и машины Изинга [10] и др. При этом недостатками СО, ограничивающими их практическое применение, являются малая выходная мощность единичного СО (примерно единицы нановатт) и большая ширина спектральной линии – единицы и десятки мегагерц на частотах в единицы гигагерц. Фазовая синхронизация многих взаимосвязанных СО (> 100) с последующим сложением мощностей осцилляторов в общей нагрузке позволяет увеличить выходную мощность, значительно уменьшить ширину спектральной линии ансамбля СО и уменьшить уровень фазового шума [11]. Взаимную синхронизацию ансамбля СО можно реализовать тремя механизмами связи: магнетодипольная связь [12], спин-волновая связь [13] и связь общим током [14, 15]. Показана как теоретическая [16], так и практическая [17] возможность получения большей выходной мощности ансамбля синхронизированных взаимосвязанных СО общим током через макроскопические контакты по сравнению с мощностью единичного осциллятора. В [18] продемонстрированы результаты по уменьшению ширины спектральной линии массива СО, связанных на наномасштабах одновременно магнетодипольной связью и связью общим током без существенного увеличения выходной мощности ансамбля СО. Когерентное сложение мощностей в общую нагрузку ансамбля синхронизированных СО, связанных спиновыми волнами, экспериментально продемонстрировано в [13]. Так, одно из ключевых направлений исследований взаимодействия СО в ансамбле – исследование влияния различных факторов на синхронизацию ансамбля. Немаловажным при объединении массива СО в ансамбли является выбор топологии связи осцилляторов. Ранее этот вопрос исследовался в ряде работ [19, 20], однако детально влияние топологии осцилляторов на быстродействие входа ансамбля СО в синхронный режим и на синхронизацию ансамбля при выходе из строя одного из осцилляторов не исследовалось.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель ансамбля N нелинейных взаимосвязанных СО в виде уравнений прецессии векторов намагниченности в комплексных амплитудах $c_{l,j}(t)$ [21]:

$$\frac{dc_l}{dt} + i\omega_{0,l}(|c_l|^2)c_l + \Gamma_{+,l}(|c_l|^2)c_l - \Gamma_{-,l}(|c_l|^2)c_l = \sum_j^N \Omega_{l,j} e^{i\beta_{l,j}} c_j, \quad (1)$$

где $\omega_{0,l}$ – собственная частота l -го осциллятора; $\Gamma_{+,l}(|c_l|^2)$ – слагаемое, характеризующее положительное нелинейное затухание; $\Gamma_{-,l}(|c_l|^2)$ – слагаемое, характеризующее отрицательные потери (эффект переноса спинового момента); $\Omega_{l,j}$ и $\beta_{l,j}$ – частотные и фазовые коэффициенты связи, описывающие взаимодействие между l -м и j -м осцилляторами, l и j меняются от 1 до N . Для анализа влияния топологии на время перехода в синхронный режим ограничимся рассмотрением динамики фаз взаимосвязанных осцилляторов, поэтому примем следующее допущение: амплитуды колебаний осцилляторов стационарны и равны. Данное приближение возможно при достаточно больших запасах по самовозбуждению [21]. С учетом $c_l = \sqrt{p_{0l}} e^{i\theta_l}$ и $p_{0l} = \text{const}$, где θ_l – фаза осциллятора, мнимая часть (1) примет вид

$$\dot{\theta}_l = \omega_{0,l} + \frac{1}{N} \sum_j^N \Omega_{l,j} \sin(\theta_j - \theta_l + \beta_{l,j}). \quad (2)$$

Здесь $\Omega_{l,j}$ – коэффициент связи между l -м и j -м осцилляторами, зависящий от физического механизма связи СО.

Полученная система дифференциальных уравнений при нулевом сдвиге разности фаз ($\beta_{l,j} = 0$) имеет вид классической модели фазовых осцилляторов Курамото [22], удобной для численного исследования синхронизации фазовых осцилляторов.

Для описания коллективной динамики ансамбля осцилляторов вводится комплексный параметр порядка [22]

$$r(t)e^{i\varphi(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)},$$

где $r(t)$ характеризует когерентность фаз ансамбля СО; $\varphi(t)$ – среднее значение фаз. Мо-

доль параметра порядка изменяется в диапазоне $0 \leq r(t) \leq 1$, где $r(t)=1$ обозначает полную синхронизацию ансамбля СО, а $r(t)=0$ – асинхронную динамику осцилляторов.

На синхронизацию ансамбля СО влияют 3 физических механизма связи: магнетодипольная (MD) связь, спин-волновая (SW) связь и связь общим током (SPC), для каждой из которых можно найти коэффициент связи Ω . Коэффициент магнетодипольной связи имеет вид [23]

$$\Omega_{MD} = \frac{V_{ef}}{a^3} \frac{\omega_M^2}{\omega_g} f(H_0),$$

где V_{ef} – эффективный объем каждого осциллятора; a – расстояние между осцилляторами; $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ (γ – гиромагнитное отношение; M_0 – намагниченность насыщения свободного слоя СО); ω_g – генерируемая частота; $f(H_0)$ – безразмерная функция порядка единицы, зависящая от амплитуды и ориентации внешнего магнитного поля.

Коэффициент спин-волновой связи рассчитывается как [23]

$$\Omega_{SW} \approx 0.65\Gamma_G \sqrt{\frac{R_c}{a}} \exp(-\Gamma_G a / v_{gr}),$$

где Γ_G – половина ширины линии ферромагнитного резонанса; R_c – радиус СО; v_{gr} – групповая скорость распространяющейся спиновой волны.

Коэффициент связи общим током имеет вид [24]

$$\Omega_{SPC} = \frac{\varepsilon g \mu_B}{2eM_0 d S} I Q_{SPC},$$

где ε – коэффициент спиновой поляризации; g – фактор Ланде; μ_B – магнетон Бора; e – заряд электрона; d – толщина свободного слоя СО; S – площадь свободного слоя СО; I – ток, протекающий через СО; Q_{SPC} – безразмерный коэффициент, характеризующий взаимодействие двух СО.

На рис. 1 представлены графики зависимостей коэффициентов магнетодипольной связи, спин-

волновой связи и связи общим током от расстояния между осцилляторами для следующих значений параметров: $V_{ef} = 12\,560 \cdot 10^{-9}$ нм; $\omega_g = 107.4$ ГГц; $\gamma = 1.76 \cdot 10^{11}$ Гц/Тл; $\mu_0 M_0 = 0.6$ Тл; $f(H_0) = 0.3$; $\Gamma_G = 10.7$ ГГц; $R_c = 20$ нм; $v_{gr} = 296.1$ м/с; $\varepsilon = 0.1$; $g = 2$; $\mu_B = 927.4 \times 10^{-26}$ Дж/Тл; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $d = 5$ нм; $S = 3.14 \cdot 10^{-14}$ м²; $Q_{SPC} = 2.5$ при значениях тока $I_1 = 50$ мкА; $I_2 = 100$ мкА; $I_3 = 500$ мкА. Видно, что магнетодипольная связь и связь спиновыми волнами зависят от расстояния, т. е. являются локальными, в то время как связь общим током нелокальная и не изменяется при увеличении расстояния между СО. Магнетодипольная связь преобладает лишь на малых расстояниях между СО ($a < 150$ нм), на расстояниях от 150 нм доминирует спин-волновая связь. Так как связь общим током не зависит от расстояния, то ее использование предпочтительнее для больших расстояний между СО ($a > 600$ нм), а также этот механизм превалирует на меньших расстояниях между осцилляторами при увеличении силы тока, протекающего через СО. Таким образом, регулируя силу тока через СО можно добиваться увеличения (или уменьшения) значения константы связи, а значит, полосы взаимной синхронизации [21].

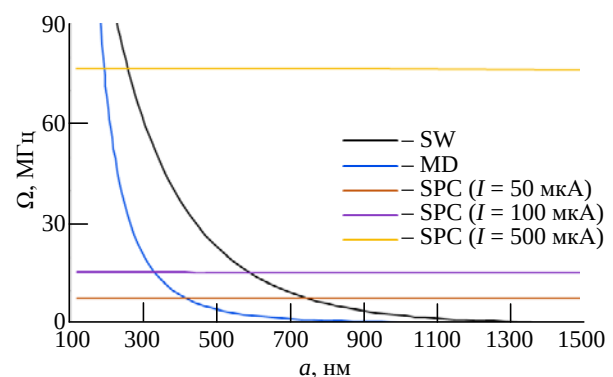


Рис. 1. Зависимость коэффициента связи Ω от расстояния a между СО для магнетодипольной связи (MD), спин-волновой (SW) и связи общим током (SPC) при трех значениях силы постоянного тока, протекающего через СО

Fig. 1. Dependence of the coupling coefficient Ω on the distance between the oscillators a connected by the common current (SPC), magneto-dipolar coupling (MD), and coupling through the radiation of propagating spin waves (SW)

Влияние топологии связи ансамбля на параметры синхронизации СО. Для исследования влияния различных топологий связи в (2) введем матрицу смежности A , характеризующую наличие или отсутствие связи между СО. Примем следующие допущения – СО идентичны, т. е. сила связи между осцилляторами $\Omega_{i,j}$ одинакова, при этом сдвиг разности фаз $\beta_{i,j} = 0$. Итоговая система дифференциальных уравнений для исследования влияния топологии связи на параметры синхронизации ансамбля СО имеет вид

$$\dot{\theta}_l = \omega_l + \frac{\Omega}{N} \sum_{j=1}^N A_{lj} \sin(\theta_j - \theta_l). \quad (3)$$

Рассмотрим 3 вида топологии связи: "линейка" (рис. 2, а), "кольцо" (рис. 2, б), "все со всеми" (рис. 2, в). Видно, что в зависимости от топологии меняется количество связей между СО: для "линейки" количество связей рассчитывается как $2N - 2$; для "кольца" – $2N$; для "все со всеми" – $N^2 - N$. Результаты численного интегрирования системы (3) – зависимости парамет-

ра порядка при $N = 10$ СО с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц для топологий "линейка", "кольцо" и "все со всеми" приведены на рис. 2, г. Начальные фазы осцилляторов выбраны случайным образом так, чтобы для каждой топологии ансамбль СО вышел в синхронный режим.

Видно, что каждой топологии в переходном режиме ($r(t) < 1$) соответствует свой наклон зависимости параметра порядка от времени, т. е. скорость синхронизации СО. Быстродействие синхронизации СО характеризуется временем переходного процесса $t_{\text{синхр}}$, в течение которого происходит полная синхронизация ансамбля СО: $r(t_{\text{синхр}}) = 0.95r_{\text{max}} + 0.05r_{\text{min}}$. Топологии "все со всеми" соответствует самое быстрое (наименьшее время переходного процесса) установление синхронного состояния.

На время переходного процесса влияют следующие 4 фактора: количество связей между СО, т. е. топология связи; количество связанных СО N ; начальные условия по фазам СО θ_i ; коэффициент связи Ω . Влияние начальных условий СО состав-

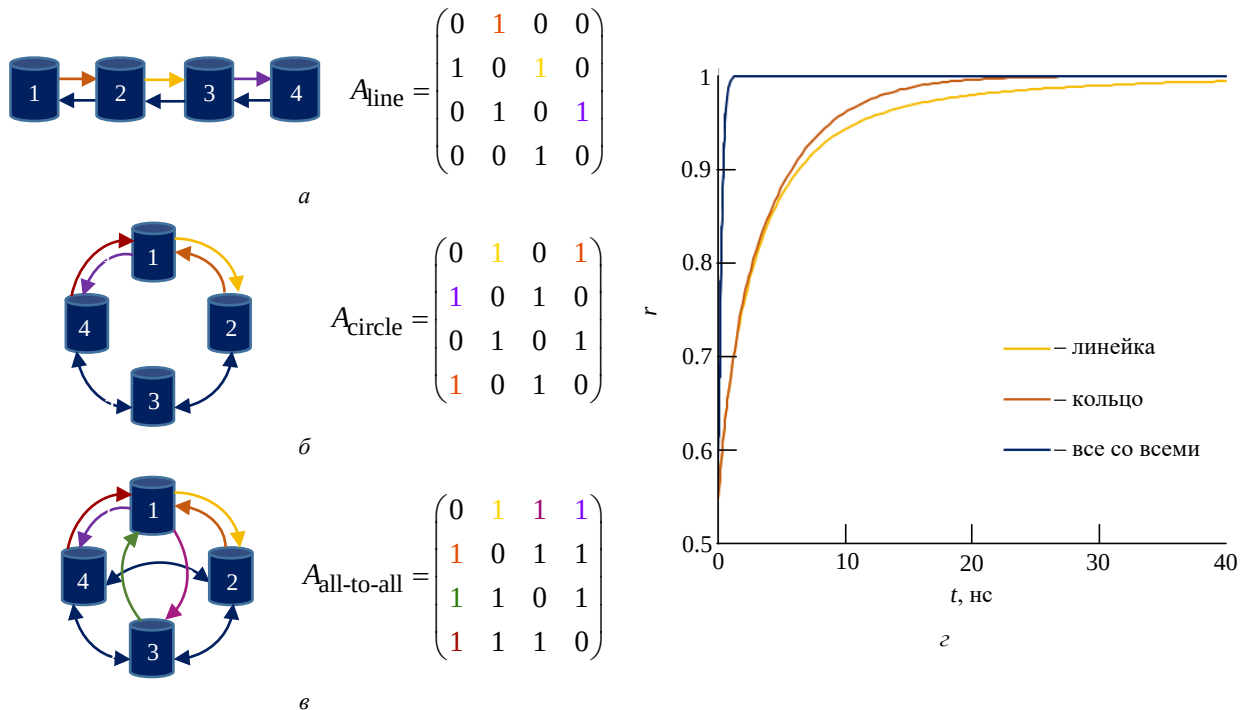


Рис. 2. Матрица смежности для $N = 4$ СО, связанных топологией "линейка" (а); "кольцо" (б); "все со всеми" (в).
Зависимость параметра порядка от времени для $N = 10$ СО, связанных "линейкой" (line), "кольцом" (circle) и "все со всеми" (all-to-all) с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц (г)

Fig. 2. Adjacency matrix for $N = 4$ SOs connected through "line" (a), "ring" (b), and "all-to-all" (c).
Dependence of the order parameter on time for $N = 10$ SOs connected through "line", "ring", and "all-to-all" topologies with a coupling coefficient $\Omega = 3$ MHz (d)

ляет предмет отдельного детального исследования и здесь не рассматривается.

На рис. 3 представлены усредненные зависимости времени переходного процесса от коэффициента связи для трех топологий: "линейка", "кольцо" и "все со всеми". Каждому значению Ω соответствует 100 случайных начальных условий СО, причем из выборки исключались случаи срыва синхронизации. Видно, что время переходного процесса уменьшается с увеличением коэффициента связи, а также с ростом количества связей между СО при постоянном N .

На рис. 4 представлены усредненные зависимости времени переходного процесса от количества осцилляторов для трех топологий:

"линейка", "кольцо" и "все со всеми". Здесь также рассматривался ансамбль осцилляторов со случайными фазами. Время переходного процесса повышается с ростом N , так как увеличивается количество фаз осцилляторов, которые необходимо синхронизировать. При этом для топологии "все со всеми" увеличение времени $t_{\text{синхр}}$ менее ощутимо вследствие более резкого повышения количества связей между СО с ростом N , в сравнении с другими топологиями.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что для уменьшения времени перехода в синхронный режим при постоянном количестве осцилляторов необходимо

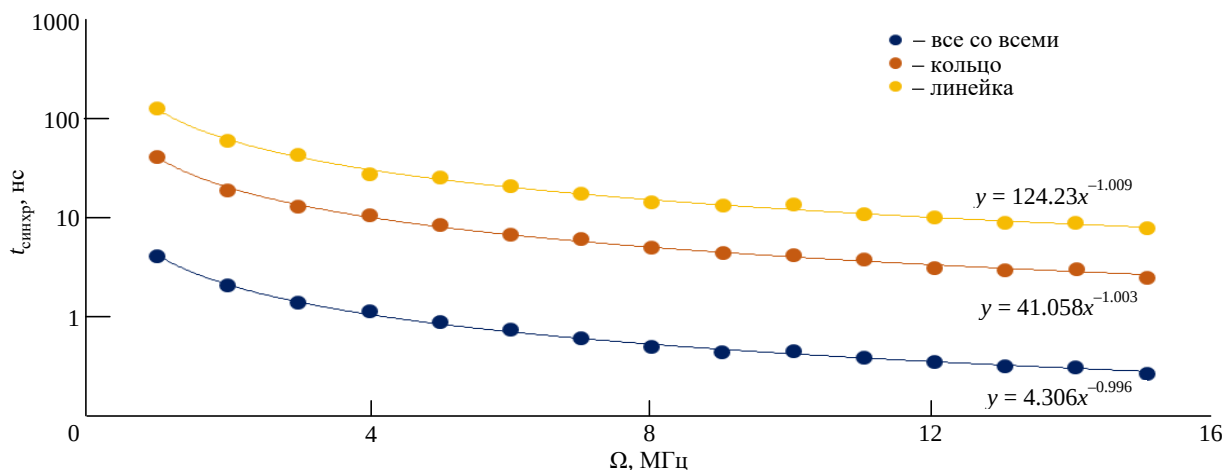


Рис. 3. Усредненные зависимости времени переходного процесса $t_{\text{синхр}}$ от коэффициента связи Ω для трех топологий ансамбля СО: "линейка", "кольцо", "все со всеми" для $N = 10$ СО с 100 случайными начальными фазами

Fig. 3. Averaged dependencies of the transition time t_{synchr} on the coupling coefficient Ω for three SO ensemble topologies: "line", "ring" and "all-to-all" for $N = 10$ SOs with 100 random initial phases

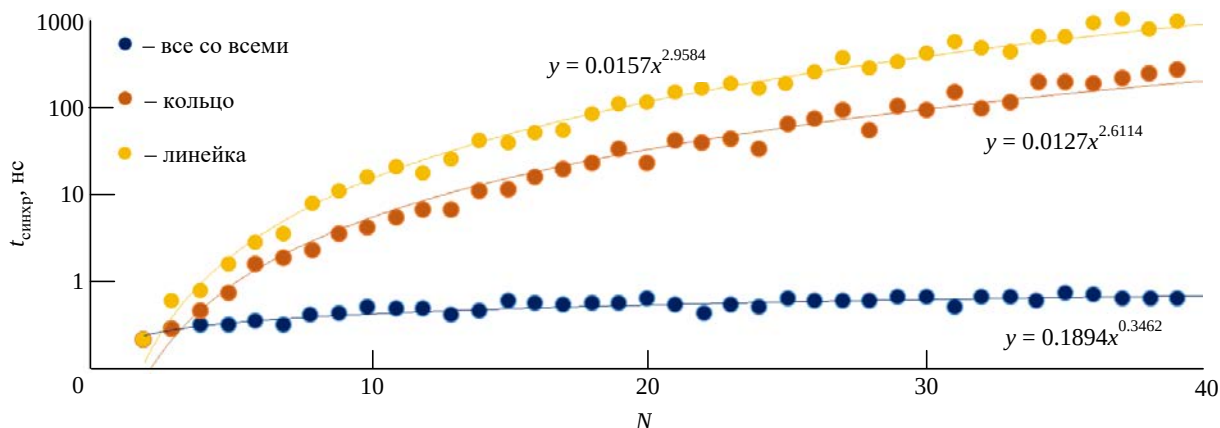


Рис. 4. Усредненные зависимости для 100 случайных начальных условий СО времени переходного процесса $t_{\text{синхр}}$ от количества СО N для трех топологий ансамбля СО: "линейка", "кольцо", "все со всеми" для $\Omega = 10$ МГц

Fig. 4. Averaged dependencies of the transition time t_{synchr} on the number of SOs N for three SO ensemble topologies: "line", "ring," and "all-to-all," with 100 random initial conditions for $\Omega = 10$ MHz

выбирать топологию с наибольшим числом связей, например "все со всеми", или комбинировать разные топологии, а также увеличивать коэффициент связи. При этом, чем выше количество связей в топологии, тем слабее меняется время $t_{\text{синхр}}$ с ростом количества взаимосвязанных СО в ансамбле.

Влияние отказа в работе СО на синхронизацию ансамбля. Помимо непрерывной динамики ансамбля осцилляторов важно также рассмотреть случаи выхода из строя элементов ансамбля. Для этого необходимо в момент выхода СО из строя изменить в (3) элемент матрицы смежности A , отвечающий за связь данного осциллятора с другими. Рассмотрим частный случай выхода из строя одного СО в топологии "кольцо". При этом коэффициент связи станет таким же, как и для топологии "линейка". Для моделирования возьмем 10 СО, связанных топологией "кольцо" с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц, и считаем, что в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс откажет один из осцилляторов. Иллюстрация геометрии задачи и зависимость параметра порядка от времени для топологий "линейка", "кольцо",

"все со всеми", а также для "кольца", в котором отказывает один из СО, представлены на рис. 5.

Видно, что при $t < t_{\text{err}}$ осцилляторы в ансамбле "кольцо с отказом" синхронизируются так же, как и в "кольце", а при $t > t_{\text{err}}$ синхронизация замедляется, так как у "линейки" время переходного процесса больше, чем у "кольца".

Рассмотрим вариант отказа осциллятора в топологии с наибольшим количеством связей между СО. Для моделирования синхронизируются 10 СО в ансамбле, связанных топологией "все со всеми" с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц, и в момент времени $t_{\text{err}} = 0.5$ нс отказывает один из СО. Сравним этот случай с непрерывной работой ансамбля СО при тех же условиях (рис. 6). Видно, что зависимости слабо расходятся и время переходного процесса отличается менее чем на 0.1 нс.

Таким образом, для нивелирования влияния отказов на общую работу ансамбля СО следует увеличивать количество связей между осцилляторами, например используя топологию "все со всеми" или введя дополнительные связи между осцилляторами.

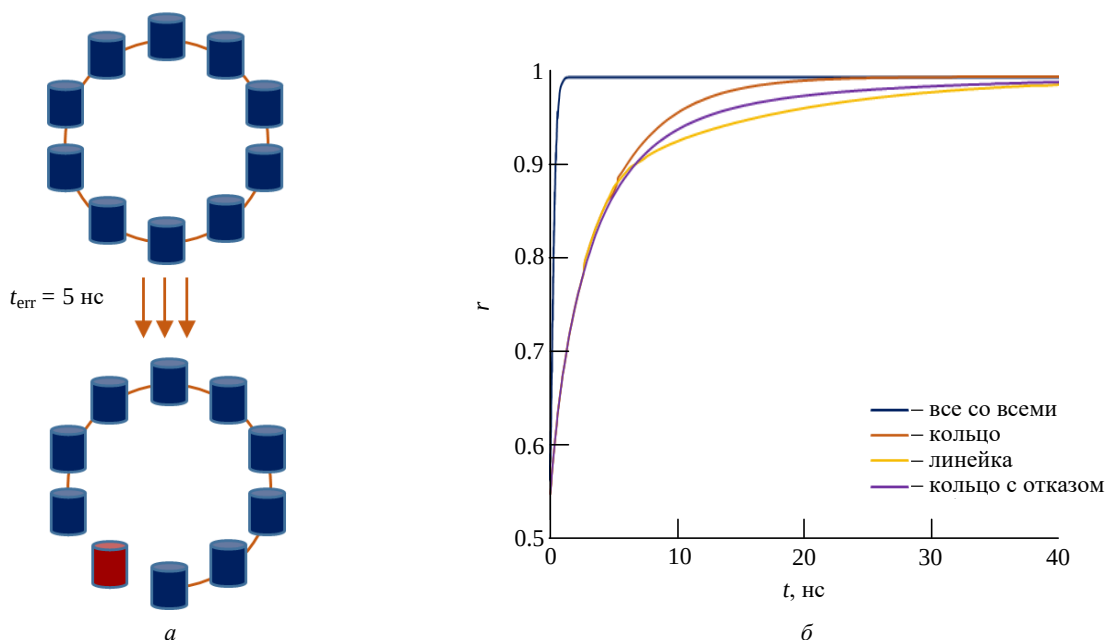


Рис. 5. Иллюстрация геометрии задачи при выходе из строя в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс одного из 10 СО, соединенных в топологии "кольцо" (а). Зависимость параметра порядка от времени для топологий "линейка", "кольцо", "все со всеми" и для топологии "кольцо" с отказом одного из СО в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс (б)

Fig. 5. The geometry of the problem when one of 10 SOs connected through the "ring" topology fails at time $t_{\text{err}} = 5$ ns (a). Dependence of the order parameter on time for the "line," "ring," "all-to-all" topologies, and the "ring" topology with one SO failure at $t_{\text{err}} = 5$ ns (b)

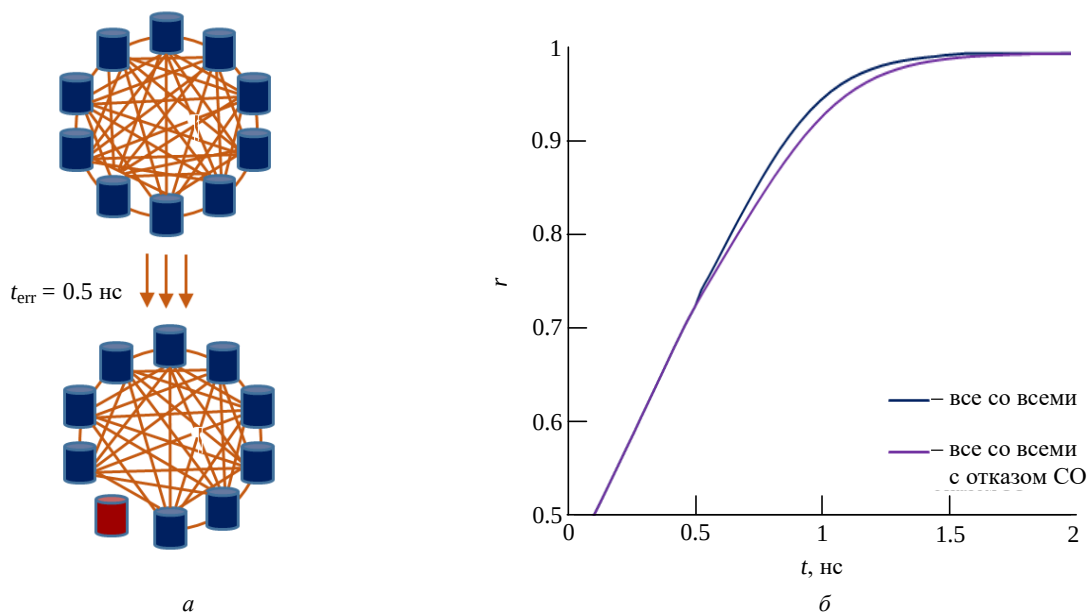


Рис. 6. Иллюстрация геометрии задачи при выходе из строя в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс одного из 10 СО, соединенных в топологии "все со всеми" (а). Зависимость параметра порядка от времени для топологии "все со всеми" с непрерывной работой СО в ансамбле и для топологии "все со всеми" с отказом одного из СО в момент времени $t_{\text{err}} = 0.5$ нс (б)

Fig. 6. The geometry of the problem when one of 10 SOs connected through the "all-to-all" topology fails at time $t_{\text{err}} = 5$ ns (a). Dependence of the order parameter on time for the "all-to-all" topology with continuous operation of SOs in the ensemble and for the "all-to-all" topology with one SO failure at $t_{\text{err}} = 0.5$ ns (b)

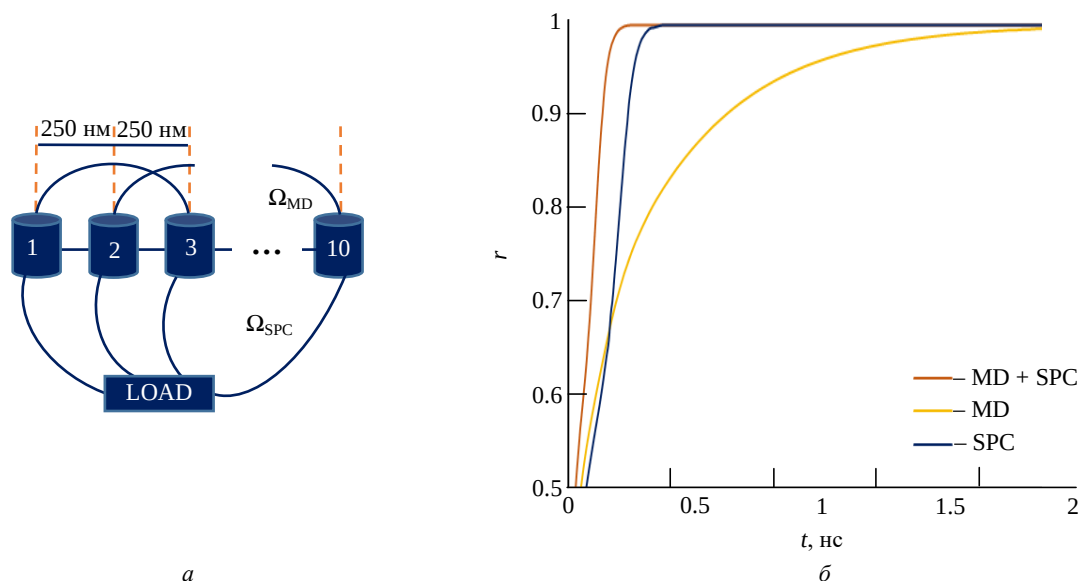


Рис. 7. Иллюстрация геометрии задачи (а). Зависимость параметра порядка от времени для 10 СО с комбинированной связью MD + SPC, с MD и с SPC (б)

Fig. 7. The geometry of the problem (a). Dependence of the order parameter on time for 10 SOs with combined MD + SPC coupling, with MD and SPC coupling types (b)

Влияние механизмов связи на синхронизацию СО. Рассмотрим ансамбль из $N = 10$ осцилляторов, связанных магнетодипольной связью с топологией "линейка". В качестве одного из способов увеличения мощности ансамбля СО в N раз, по сравнению с мощностью еди-

ничного СО, будем складывать выходную мощность каждого СО ансамбля в общую нагрузку. Так возникает еще одна связь всех СО между собой через общий ток по топологии "все со всеми" (рис. 7, а). Тогда уравнение (3) преобразуется к следующему виду:

$$\dot{\theta}_l = \omega_l + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Omega_{MDlj} \sin(\theta_j - \theta_l) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Omega_{SPClj} \sin(\theta_j - \theta_l),$$

где Ω_{MD} и Ω_{SPC} – коэффициенты магнетодипольной связи и связи общим током соответственно. Пусть расстояние между соседними осцилляторами составляет 250 нм. Тогда коэффициент магнетодипольной связи для двух соседних осцилляторов на рис. 2 будет $\Omega = 33$ МГц, а через один СО – $\Omega = 5$ МГц, так как магнетодипольная связь уменьшается с увеличением расстояния между СО. Для больших расстояний (> 750 нм) магнетодипольная связь будет слишком мала, поэтому связью через 2 и более СО можно пренебречь. При этом связь общим током не зависит от расстояния и для силы тока в 50 мкА равна 8 МГц.

Зависимость параметра порядка от времени ансамбля 10 СО с двумя механизмами связи, а также с магнетодипольной связью 10 СО по топологии "линейка" (MD) и отдельно со связью общим током по топологии "все со всеми" (SPC) с коэффициентами связи Ω_{MD} и Ω_{SPC} соответ-

ственно показана на рис. 7, б. Видно, что синхронизация для комбинированной связи (магнетодипольная связь + связь общим током (MD + SPC)) наступает раньше, чем для одиночного механизма связи. Интересно, что для топологии "все со всеми" с коэффициентом связи $\Omega = 8$ МГц синхронизация СО наступает раньше, чем для топологии "линейка" с коэффициентом связи $\Omega = 33$ МГц для соседних и $\Omega = 5$ МГц через один СО. Для снижения времени переходного процесса синхронизации СО необходимо уменьшать расстояние между СО для локальной связи и использовать топологии с большим числом связей между осцилляторами, например, располагать СО в виде решетки, а не линейки, а также комбинировать механизмы связи ансамбля СО.

Рассмотрим отказ в работе осциллятора ансамбля СО с комбинированной связью. Пусть в рассмотренной ранее модели откажет один осциллятор (рис. 8, а) в момент времени $t_{\text{err}} = 1$ нс. Из рис. 8 видно, что в случае отказа одного из осцилляторов (MD + SPC с отказом) синхронизация произойдет позднее, чем для случая безотказной работы ансамбля. При этом время переходного процесса у ансамбля с отказом СО все еще меньше, чем у ансамбля СО с одиночной связью.

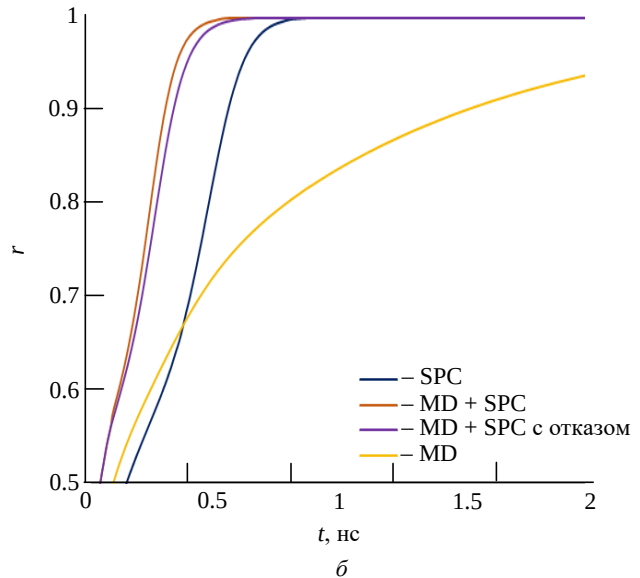
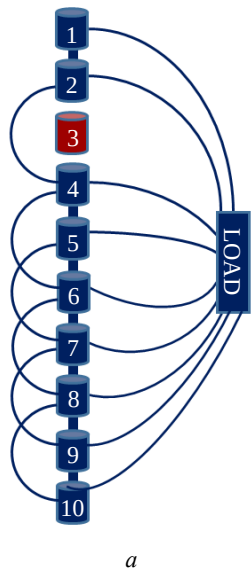


Рис. 8. Иллюстрация геометрии задачи ансамбля СО с комбинированной связью с отказом одного из осцилляторов в момент времени $t_{\text{err}} = 1$ нс (а). Зависимость параметра порядка от времени для ансамбля СО с комбинированной связью MD + SPC, с MD + SPC с отказом, а также для MD и SPC (б)

Fig. 8. The geometry of the problem for an SOs ensemble with combined coupling, with one oscillator failing at $t_{\text{err}} = 1$ ns (a). Dependence of the order parameter on time for an SOs ensemble with combined (MD + SPC) coupling, MD + SPC with failure, as well as for MD and SPC coupling types (b)

Заключение. Использование локальной связи ансамбля СО с малым расстоянием ($a < 500$ нм) между осцилляторами позволяет получить высокие значения коэффициентов связи Ω , что в свою очередь влияет на быстродействие синхронизации: с увеличением коэффициента связи уменьшается время переходного процесса. Однако именно связь общим током, имеющая сравнительно низкие значения коэффициента связи между осцилляторами, обеспечивает оптимальную топологию связи СО "все со всеми" с наибольшим числом связей между осцилляторами и постоянное значение

коэффициента связи в независимости от расстояния между СО. Это в свою очередь обеспечивает высокое быстродействие перехода в синхронный режим ансамбля СО, по сравнению с другими топологиями ансамблей СО, и уменьшает влияние отказа в работе осциллятора на $t_{\text{синхр}}$. Связь общим током позволяет синхронизировать большое количество СО в ансамбле без существенного увеличения времени переходного процесса, и ее предпочтительнее использовать для синхронизации больших ансамблей в устройствах спинтроники.

Список литературы

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 12. С. 1336–1348. doi: 10.3367/UfNr.0178.200812f.1336
2. CMOS compatible W/CoFeB/MgO spin Hall nano-oscillators with wide frequency tunability / M. Zahedinejad, H. Mazraati, H. Fulara, J. Yue, S. Jiang, A. Awad, J. Åkerman // Applied Physics Let. 2018. Vol. 112, № 13. P. 132404. doi: 10.1063/1.5020260
3. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current / S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley, R. J. Schoelkopf, R. A. Buhrman, D. C. Ralph // Nature. 2003. Vol. 425, № 6956. P. 380–383. doi: 10.1038/nature01967
4. Ralph D. C., Stiles M. D. Spin transfer torques // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. Vol. 320, № 7. P. 1190–1216. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.12.019
5. Magnetoresistive random access memory / J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, R. Meserve // Physical Review Let. 1995. Vol. 74, № 16. P. 3273–3276.
6. Sensitivity and Noise of a Magnetic Field Sensor Based on Magnetostatic Spin Wave YIG Device and Its Integrated Electronics / O. Haas, B. Dufay, S. Saez, C. Dolabdjian // IEEE Sensors J. 2020. Vol. 20, № 23. P. 14289–14296. doi: 10.1109/JSEN.2020.3008555
7. Митрофанов А. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н. Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора // Письма в журн. техн. физики. 2014. Т. 40, вып. 13. С. 66–72.
8. 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, № 12. P. 123903. doi: 10.1063/1.4997160
9. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N. Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator // Technical Physics Let. 2014. Vol. 40. P. 571–573. doi: 10.1134/S1063785014070074
10. Spintronic devices as next-generation computation accelerators / V. H. González, A. Litvinenko, A. Kumar, R. Khymyn, J. Åkerman // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2024. Vol. 28, № 1. Art. № 101173. doi: 10.1016/j.cossms.2024.101173
11. Two-dimensional mutually synchronized spin Hall nano-oscillator arrays for neuromorphic computing / M. Zahedinejad, A. A. Awad, S. Muralidhar, R. Khymyn, H. Fulara, H. Mazraati, M. Dvornik, J. Åkerman // Nature Nanotechnology. 2020. Vol. 15, № 1. P. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
12. Phase locking dynamics of dipolarly coupled vortex-based spin transfer oscillators / A. D. Belanovsky, N. Locatelli, P. N. Skirdkov, F. Abreu Araujo, J. Grollier, K. A. Zvezdin, V. Cros, A. K. Zvezdin // Physical Review B. 2012. Vol. 85, № 10. P. 100409. doi: 10.1103/PhysRevB.85.100409
13. Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators / S. Kaka, M. R. Pufall, W. H. Rippard, T. J. Silva, S. E. Russek, J. A. Katine // Nature. 2005. Vol. 437, № 7057. P. 389–392. doi: 10.1038/nature04035
14. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of spin-transfer oscillators driven by stimulated microwave currents // Physical Review B. 2006. Vol. 73, № 6. P. 060409. doi: 10.1103/PhysRevB.73.060409
15. Taniguchi T. Synchronization of Spin Torque Oscillators through Spin Hall Magnetoresistance // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53, № 11. P. 1–7. Art. № 3400907. doi: 10.1109/TMAG.2017.2704588
16. Impact of the electrical connection of spin transfer nano-oscillators on their synchronization: an analytical study / B. Georges, J. Grollier, V. Cros, A. Fert, A. V. Khvalkovskiy, K. A. Zvezdin // Applied Physics Let. 2008. Vol. 92, № 23. P. 232504. doi: 10.1063/1.2945636
17. Electrically connected spin-torque oscillators array for 2.4 GHz WiFi band transmission and energy harvesting / R. Sharma, R. Mishra, T. Ngo, Y. X. Guo, S. Fukami, H. Sato, H. Ohno, H. Yang // Nature Communications. 2021. Vol. 12, № 1. Art. № 2924. doi: 10.1038/s41467-021-23181-1
18. Two-dimensional mutual synchronization in spin Hall nano-oscillator arrays / M. Zahedinejad, A. A. Awad, S. Muralidhar, R. Khymyn, H. Fulara, H. Mazraati, M. Dvornik, J. Åkerman // Nature Nanotechnology. 2020. Vol. 15, № 1. P. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
19. Synchronization in complex networks / A. Arenas, A. Díaz-Guilera, J. Kurths, Y. Moreno, C. Zhou // Physics

Reports. 2008. Vol. 469, № 3. P. 93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002

20. Coletta T., Delabays R., Jacquod P. Finite-size scaling in the Kuramoto model // Physical Review E. 2017. Vol. 95, № 4. P. 042207. doi: 10.1103/PhysRevE.95.042207

21. Slavin A., Tiberkevich V. Excitation of Spin Waves by Spin-Polarized Current in Magnetic Nano-Structures // IEEE Transactions on Magnetism. 2008. Vol. 44. P. 1916–1927. doi: 10.1109/TMAG.2008.924537

22. Kuramoto Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Nonlinear Oscillators. Intern. Symp. on Mathemati-

cal Problems in Theoretical Physics // Lecture Notes in Physics. 1975. Vol. 39. P. 420–422. doi: 10.1007/BFb0013365

23. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // IEEE Transactions on Magnetism. 2009. Vol. 45, № 4. P. 1875–1918. doi: 10.1109/TMAG.2008.2009935

24. Tsyrlnikova L. A., Safin A. R. Mutually synchronized spin Hall nano-oscillators by a common current // Proc. of the Samarkand Intern. Symp. on Magnetism, Samarkand, Uzbekistan, 2–6 July 2023. P. 57.

Информация об авторах

Цырульникова Людмила Александровна – инженер по специальности "Радиотехника" (2020, НИУ "МЭИ"), ассистент кафедры формирования и обработки радиосигналов указанного университета, инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов: радиотехника; спинтроника; система фазовой синхронизации; синхронизация.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: mila.tsyrlnikova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0385-8029>

Фролов Даниил Андреевич – кандидат технических наук (2021), доцент Национального исследовательского университета "МЭИ". Автор 14 научных публикаций. Сфера научных интересов: автогенераторы; бигармонические автогенераторы; генераторы шума; синхронизация автогенераторов.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: FrolovDanA@mpei.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Сафин Ансар Ризаевич – доктор физико-математических наук (2023), доцент, заместитель директора по научной работе ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, руководитель лаборатории, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета "МЭИ". Глава отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; радиотехника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д.11, к.7, Москва, 125009, Россия
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Fert A. Origin, Development, and Prospects of Spintronics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2008, vol. 178, no. 12, pp. 1336–1348. doi: 10.3367/UFNr.0178.200812f.1336

2. Zahedinejad M., Mazraati H., Fulara H., Yue J., Jiang S., Awad A., Åkerman J. CMOS Compatible W/CoFeB/MgO Spin Hall Nano-Oscillators with Wide Frequency Tunability. *Applied Physics Lett*. 2018, vol. 112, no. 13, p. 132404. doi: 10.1063/1.5020260

3. Kiselev S. I., Sankey J. C., Krivorotov I. N., Emley N. C., Schoelkopf R. J., Buhrman R. A., Ralph D. C. Microwave Oscillations of a Nanomagnet Driven by a Spin-Polarized Current. *Nature*. 2003, vol. 425, no. 6956, pp. 380–383. doi: 10.1038/nature01967

4. Ralph D. C., Stiles M. D. Spin Transfer Torques. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, vol. 320, no. 7, pp. 1190–1216. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.12.019

5. Moodera J. S., Kinder L. R., Wong T. M., Meservey R. Magnetoresistive Random Access Memory. *Physical Review Lett*. 1995, vol. 74, no. 16, pp. 3273–3276.

6. Haas O., Dufay B., Saez S., Dolabdjian C. Sensitiv-

ity and Noise of a Magnetic Field Sensor Based on Magnetostatic Spin Wave YIG Device and Its Integrated Electronics. *IEEE Sensors J*. 2020, vol. 20, no. 23, pp. 14289–14296. doi: 10.1109/JSEN.2020.3008555

7. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N. Phase Synchronization System of a Spin-Transfer Nano-Oscillator. *Technical Physics Lett*. 2014, vol. 40, iss. 13, pp. 66–72. (In Russ.)

8. 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, no. 12, p. 123903. doi: 10.1063/1.4997160

9. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N. Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator. *Technical Physics Lett*. 2014, vol. 40, pp. 571–573. doi: 10.1134/S1063785014070074

10. González V. H., Litvinenko A., Kumar, Khymyn A. R., Åkerman J. Spintronic Devices as Next-Generation Computation Accelerators. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2024, vol. 28, no. 1, art. no. 101173. doi: 10.1016/j.cossms.2024.101173

11. Zahedinejad M., Awad A. A., Muralidhar S., Khymyn R., Fulara H., Mazraati H., Dvornik M., Åkerman J. Two-Dimensional Mutually Synchronized Spin Hall Nano-Oscillator Arrays for Neuromorphic Computing. *Nature Nanotechnology*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
12. Belanovsky A. D., Locatelli N., Skirdkov P. N., Abreu Araujo F., Grollier J., Zvezdin K. A., Cros V., Zvezdin A. K. Phase Locking Dynamics of Dipolarly Coupled Vortex-Based Spin Transfer Oscillators. *Physical Review B*. 2012, vol. 85, no. 10, p. 100409. doi: 10.1103/PhysRevB.85.100409
13. Kaka S., Pufall M. R., Rippard W. H., Silva T. J., Russek S. E., Katine J. A. Mutual Phase-Locking of Microwave Spin Torque Nano-Oscillators. *Nature*. 2005, vol. 437, no. 7057, pp. 389–392. doi: 10.1038/nature04035
14. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of Spin-Transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents. *Physical Review B*. 2006, vol. 73, no. 6, p. 060409. doi: 10.1103/PhysRevB.73.060409
15. Taniguchi T. Synchronization of Spin Torque Oscillators through Spin Hall Magnetoresistance. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1–7, art. no. 3400907. doi: 10.1109/TMAG.2017.2704588
16. Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A., Khvalkovskiy A. V., Zvezdin K. A. Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-Oscillators on Their Synchronization: an Analytical Study. *Applied Physics Lett.* 2008, vol. 92, no. 23, p. 232504. doi: 10.1063/1.2945636
17. Sharma R., Mishra R., Ngo T., Guo Y. X., Fukami S., Sato H., Ohno H., Yang H. Electrically Connected Spin-Torque Oscillators Array for 2.4 GHz WiFi Band Transmission and Energy Harvesting. *Nature Communications*. 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 2924. doi: 10.1038/s41467-021-23181-1
18. Zahedinejad M., Awad A. A., Muralidhar S., Khymyn R., Fulara H., Mazraati H., Dvornik M., Åkerman J. Two-Dimensional Mutual Synchronization in Spin Hall Nano-Oscillator Arrays. *Nature Nanotechnology*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
19. Arenas A., Díaz-Guilera A., Kurths J., Moreno Y., Zhou C. Synchronization in Complex Networks. *Physics Reports*. 2008, vol. 469, no. 3, pp. 93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002
20. Coletta T., Delabays R., Jacquod P. Finite-Size Scaling in the Kuramoto Model. *Physical Review E*. 2017, vol. 95, no. 4, p. 042207. doi: 10.1103/PhysRevE.95.042207
21. Slavin A., Tiberkevich V. Excitation of Spin Waves by Spin-Polarized Current in Magnetic Nano-Structures. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, vol. 44, pp. 1916–1927. doi: 10.1109/TMAG.2008.924537
22. Kuramoto Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Nonlinear Oscillators. *Intern. Symp. on Mathematical Problems in Theoretical Physics. Lecture Notes in Physics*. 1975, vol. 39, pp. 420–422. doi: 10.1007/BFb0013365
23. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1875–1918. doi: 10.1109/TMAG.2008.2009935
24. Tsyrlnikova L. A., Safin A. R. Mutually Synchronized Spin Hall Nano-Oscillators by a Common Current. *Proc. of the Samarkand Intern. Symp. on Magnetism, Samarkand, Uzbekistan, 2–6 July 2023*. P. 57.

Information about the authors

Ludmila A. Tsyrlnikova, engineer in "Radio Engineering" (2020, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"), assistant at the Department of Radio Signal Formation and Processing of the named university, engineer of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; spintronics; phase-locked loop; synchronization. Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
E-mail: mila.tsyrlnikova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0385-8029>

Daniil A. Frolov, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor of National Research University "Moscow Power Engineering Institute". The author of 14 scientific publications. . Area of expertise: auto-generators; bi-harmonic auto-generators; noise generators; auto-generator synchronization. Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
Email: FrolovDanA@mpei.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Ansar R. Safin, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2023), Associate Professor, Deputy Director for Research of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Radio Signal Generation and Processing of National Research University "Moscow Power Engineering Institute". Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; radio engineering; physics of magnetic phenomena; spintronics. Address: Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 11, Mokhovaya St., Moscow 125009, Russia
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

Многофункциональный тепловизионный комплекс для медицинской диагностики

Н. Н. Потрахов¹, С. А. Ростачев¹, Е. Е. Ладожская-Гапеев², К. К. Гук^{1✉}

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

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет
им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

✉ kzhamova@gmail.com

Аннотация

Введение. Быстрое развитие тепловизионной техники и наличие определенного опыта инструментального анализа тепловых процессов в теле пациента с целью определения его состояния создают предпосылки к разработке перспективного современного медицинского тепловизионного комплекса (тепловизора).

Цель работы. Создание отечественного "малобюджетного" медицинского тепловизионного комплекса для медицинской диагностики с расширенными функциональными возможностями.

Материалы и методы. Распределение температуры на поверхности тела человека зависит от его внутреннего состояния и внешней среды. Для каждого человека это распределение имеет свои физиологические особенности, изучение и интерпретация которых могут быть значимыми для диагностики конкретных патологий или оценки общего (психофизического) состояния. Результаты анализа температурных полей на поверхности тела человека позволяют диагностировать различные патологические процессы, которые проявляются в виде локальных изменений температуры на отдельных его участках. Предлагаемая методика термодиагностики предполагает измерение температуры в каждой точке такого участка одномоментно (в статике) или на протяжении некоторого времени (в динамике). В отличие от традиционного подхода для этой цели используется два тепловизионных датчика: матричный малоформатный, а потому "малобюджетный", и точечный. Такая комбинация датчиков при съемке с уменьшенного в разы, по сравнению с традиционным подходом, расстояния обеспечивает необходимую дискретизацию картины температурного поля даже больших по площади участков поверхности тела человека.

Результаты. Разработаны принципиальная электрическая схема и конструкция современного тепловизионного комплекса. Оценены его преимущества перед аналогичными устройствами. Предложена и апробирована методика регистрации и анализа температуры в точке, а также температурного поля как отдельного участка, так и больших по площади областей на поверхности тела человека.

Заключение. Апробация материального макета тепловизионного комплекса на базе крупных медицинских учреждений Санкт-Петербурга показала его широкие функциональные возможности при простоте и удобстве эксплуатации.

Ключевые слова: тепловизор, термограмма, температурное поле, тепловизионный комплекс, медицинская диагностика

Для цитирования: Многофункциональный тепловизионный комплекс для медицинской диагностики / Н. Н. Потрахов, С. А. Ростачев, Е. Е. Ладожская-Гапеев, К. К. Гук // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 77–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-77-90

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.05.2024; принята к публикации после рецензирования 19.06.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



Multifunctional Thermal Imaging Complex for Medical Diagnostics

Nikolay N. Potrakhov¹, Sergey A. Rostachev¹,
Ekaterina E. Ladozhskaya-Gapeenko², Karina K. Guk^{1✉}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Academician I. P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St Petersburg, Russia

✉kzhamova@gmail.com

Abstract

Introduction. Recent developments in the field of thermal imaging technology and the accumulated experience in instrumental analysis of thermal processes in the patient's body indicate the prospects of developing new medical thermal imaging systems (thermal imagers).

Aim. Creation of a low-budget domestic thermal imaging system for medical diagnostics with expanded functionality.

Materials and methods. The distribution of temperature over the surface of the human body depends on its internal state and external environment. For each person, this distribution has its own physiological characteristics, the study and interpretation of which can be significant for diagnosing specific pathologies or assessing the general (psychophysical) state of the patient. Analysis of temperature fields on the surface of the human body makes it possible to diagnose various pathological processes manifested in the form of local temperature changes in individual areas. The proposed method for thermal diagnostics involves measuring the temperature at each point of such an area simultaneously (statically) or over a period of time (dynamically). In comparison with conventional approaches, two thermal imaging sensors are used for this purpose. These include a small-sized matrix (thus being low cost) and a point sensor. Such a combination of sensors provides for the necessary discretization of the temperature field image of sufficiently large areas of the surface of the human body, when shooting from a distance significantly reduced compared to the conventional approach.

Results. A conceptual electrical circuit and a layout of a modern thermal imaging system are developed. The advantages of the proposed thermal imager over similar devices are assessed. A method for recording and analyzing temperature in a certain point and temperature fields of both separate areas and large areas on the surface of the human body is proposed and tested.

Conclusion. The conducted testing of a material model of the proposed thermal imaging system using the facilities of large medical institutions in St. Petersburg showed its wide functionality along with simplicity and convenience.

Keywords: thermal imager, thermogram, temperature field, thermal imaging system, medical diagnostics

For citation: Potrakhov N. N., Rostachev S. A., Ladozhskaya-Gapeenko E. E., Guk K. K. Multifunctional Thermal Imaging Complex for Medical Diagnostics. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 77–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-77-90

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

Submitted 16.05.2024; accepted 19.06.2024; published online 29.11.2024

Введение. В настоящее время так называемые медицинские тепловизоры представляют собой универсальные технические средства измерения температуры высшей ценовой категории, адаптированные для медицинских задач путем расширения программного обеспечения [1]. Только в этом случае, при дополнительной и достаточно сложной математической обработке температурных данных, которые изначально носят информационно качественный вид, можно получить более или менее достоверный результат.

Для широкого внедрения тепловизионной техники в медицинскую практику важное значение будет иметь изменение подхода к тепловизионным исследованиям: получение не только качественных, но и количественных характеристик температурного поля, обеспечение точности позиционирования области интереса, а также удобство эксплуатации, простота конструкции и доступная стоимость тепловизионного комплекса. В противном случае анализ тепловых процессов превращается в "искус-

ство" или академическое исследование с достаточно сложной математической постобработкой температурных данных, в том числе с использованием статистических методов, что не позволяет применять такой комплекс в повседневной практике врача [2].

Очевидно, что для разработки отечественного медицинского тепловизора, многофункционального, простого в использовании и доступного по цене, необходимо проведение серьезных как конструкторско-технологических, так и клинических исследований [3–5].

Материалы и методы.

1. Распределение температуры на поверхности тела человека зависит от его внутреннего состояния и внешней среды. Для каждого человека это распределение имеет свои физиологические особенности, изучение и интерпретация которых могут быть значимыми для диагностики конкретных патологий или определения общего (психофизического) состояния. Так, тепловидение позволяет по статическому температурному распределению или его динамике в течение определенного времени выявить функциональную активность различных органов тела человека. Результаты анализа температурных полей (термограмм) основываются на сопоставлении тепловой информации, получаемой от поверхности различных участков тела человека. Высокоинформативными участками являются те, в пределах которых температурные изменения проявляются наиболее интенсивно по сравнению с соседними. Как показано в [6–8], применение контролируемых температурных нагрузок позволяет по пространственной и амплитудной динамике термореакций исследовать механизм терморегуляции в норме, а при диагностируемых поражениях – на разных уровнях реакций периферического кровотока и, таким образом, соотносить искажение нормальных проявлений с характером нарушений.

Стандартная методика термодиагностики предполагает тепловую съемку именно таких – сравнительно небольших (практически точечных) участков тела.

При разработке тепловизора был также учтен имеющийся опыт использования методов анализа теплового излучения от пациента и

соответствующих технических средств его регистрации [9, 10].

2. Физической величиной, которую регистрирует тепловизор, является поток теплового излучения (мощность) F от объекта термодиагностики. Мощность F [Вт] является функцией двух неизвестных – температуры объекта t [°C] и его коэффициента излучения ε в рабочем спектральном диапазоне тепловизионного датчика и рабочем диапазоне измеряемых значений температуры. Максимальная спектральная плотность теплового излучения кожи человека соответствует 10 мкм. Коэффициент излучения кожи на этой длине волны в диапазоне температур 31...42 °C равен 0.98.

Предлагаемая методика применения тепловизора предполагает термографию участка тела пациента с малого расстояния – от 50 мм. На этом расстоянии используемый малоформатный, а потому "малобюджетный" матричный тепловизионный датчик (24 × 32 пикселя) обеспечивает получение теплового изображения объекта с дискретизацией деталей изображения размером не более 1×1 мм. Поскольку тепловые процессы в зависимости от их природы занимают существенно большие объемы в теле человека, более высокая дискретизация картины температурного поля избыточна и нецелесообразна.

Процесс излучения тепла кожей человека подчиняется II закону освещенности (закон Ламберта). В этом случае тепловая яркость плоского объекта наблюдения остается постоянной при отклонении оси наблюдения от нормали к поверхности объекта до 55°. Соответственно, нет жестких ограничений на угол этого отклонения в ходе измерений температуры конкретного участка кожного покрова.

3. В состав разработанного многофункционального тепловизионного комплекса входят устройство для измерения температуры на поверхности тела пациента, собственно тепловизор под названием ТВС-2, и персональный компьютер (ПК) с установленным оригинальным программным обеспечением (ПО).

Основными элементами тепловизора ТВС-2 являются:

– матричный тепловизионный датчик (МТД) MLX90640 с форматом 24 × 32 пикселя, размер пикселя 20 мкм, разрешение при определении температуры в каждом пикселе 0.1 °C;

– точечный тепловизионный датчик (ТТД) MLX90614, разрешение при определении температуры $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– широкоугольная телевизионная (ТВ) камера типа OV2643 форматом 1200×1600 пикселей с углом обзора 120° .

Принцип действия и структурная схема тепловизора ТВС-2 проиллюстрированы на рис. 1, 2.

МТД, ТТД, ТВ-камера, а также лазерный датчик дальности (ДД) располагаются в одной плоскости (рис. 1). Микроконтроллер (МК) осуществляет непрерывный сбор данных о температуре на поверхности объекта и расстоянии до него через интерфейс I²C. ПК получает эту информацию от МК, а также видеоизображение участка поверхности объекта от ТВ-камеры объекта по USB-разъему (рис. 2).

Для более точного определения местоположения диагностируемого участка на поверхности объекта используются лазерный указатель (ЛУ) и светодиодная подсветка (СДП). Совмещение теплового и видеоизображения участка поверхности объекта термодиагностики при наличии ДД (указателя дальности) и световой метки от ЛУ позволяет проводить

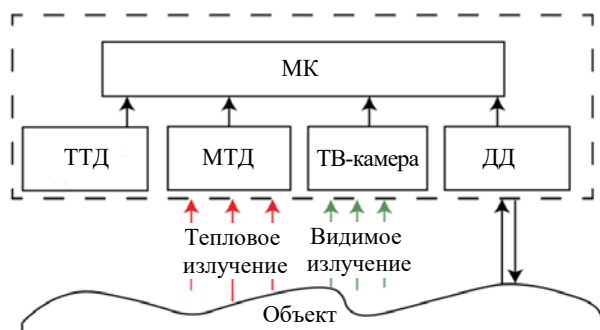


Рис. 1. Принцип действия тепловизора

Fig. 1. Operating principle of a thermal imager

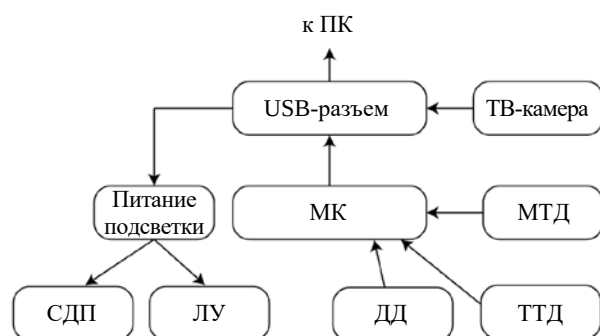


Рис. 2. Структурная схема тепловизора

Fig. 2. Block diagram of a thermal imager

термографию (тепловое сканирование) всей поверхности объекта и получать точную количественную информацию о пространственном распределении температуры на его конкретном участке. Таким образом, основной "недостаток" выбранного тепловизионного датчика – малый формат не ограничивает возможности тепловизора ТВС-2 при проведении тепловой съемки с малого расстояния. Наоборот, бюджетный малоформатный датчик при наличии дальномера позволяет вычислять размер пикселя теплового изображения, его температуру и отображать на экране ПК все пиксели, т. е. количественно оценить размеры области интереса на термограмме. Соответственно, при сохранении необходимой и достаточной детализации термограммы принципиально снижается стоимость тепловизора в целом.

Все элементы, отдельные узлы и печатные платы с электронными компонентами тепловизора ТВС-2 располагаются в эргономичном пластмассовом корпусе с рукояткой пистолетного типа (рис. 3).

Рукоятка снабжена специальным крепежом для установки в случае необходимости тепловизора на фотоштатив. На лицевой поверхности тепловизора размещены температурные датчики, ТВ-камера, ДД, ЛУ, СДП, а на рукоятке – кнопка фиксации температуры (рис. 3, а).

На тыльной поверхности корпуса тепловизора размещен ЖК-индикатор, отображающий:

- минимальную, среднюю и максимальную температуру участка поверхности, измеряемую с помощью МТД;
- температуру в точке этого участка, измеряемую с помощью ТТД;
- дистанцию до области исследования, измеряемую с помощью ДД.

Основные технические характеристики и функциональные возможности тепловизора ТВС-2:

1. Температурная чувствительность (ТЧ) – наименьшая разность температур, регистрируемая в пределах одного пикселя теплового изображения участка на поверхности объекта.

МТД тепловизора ТВС-2 обеспечивает ТЧ не более $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне измеряемых температур $20\ldots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Поле зрения (ПЗ) – область на поверхности объекта, температурное поле которой реги-



Рис. 3. Материальный макет тепловизора ТВС-2: *а* – лицевая сторона корпуса; *б* – тыльная сторона корпуса

Fig. 3. Material model of TVS-2 thermal imager: *a* – front side of the case; *b* – back side of the case

стрирует матричный тепловизионный датчик. ПЗ определяется углом зрения (УЗ) датчика, конусообразным или пирамидальным, в зависимости от конструкции тепловизионного объектива и расстоянием от датчика до объекта.

УЗ тепловизора ТВС-2 – пирамидального типа, углы раствора пирамиды составляют 55° по горизонтали и 35° по вертикали.

3. Наименьший видимый объект или пространственное разрешение тепловизора ТВС-2 на расстоянии от МТД до поверхности объекта (фокусном расстоянии) 50 мм составляет около 1 мм.

4. Важным дополнительным инструментом тепловизора ТВС-2 является ТТД. Он позволяет измерять абсолютное значение температуры в конкретной точке на поверхности объекта термодиагностики. ТЧ точечного датчика равна 0.02°C . Дальность измерения составляет 5...500 мм. УЗ датчика конусообразный, угол раствора конуса равен $\pm 5^\circ$. На расстоянии 50 мм диаметр точки, в которой измеряется температура, составляет 1 мм. Наведенный на область интереса ТТД позволяет наблюдать динамику теплового процесса (высокоточное измерение температуры) в режиме реального времени.

Выбор области интереса осуществляется путем анализа термограммы, полученной с помощью МТД. При этом измеренные значения температуры выводятся в отдельное окно на

экране ПК и протоколируются. Пауза между измерениями составляет от 0.125 до 2 с, значения температуры также выводятся в отдельное окно.

5. Лазерный ДД позволяет обеспечить повторяемость условий тепловой съемки путем точного измерения расстояния до объекта, а также предоставляет информацию о текущем размере пикселя теплового изображения и, соответственно, об анатомических (геометрических) размерах зоны интереса.

Для обеспечения работы тепловизора и обработки получаемых термограмм разработано специализированное ПО – программа для ЭВМ "TermoLabs" [3].

Основные функции, реализуемые ПО "TermoLabs":

- получение тепловизионных изображений и выбор частоты регистрации термограмм (кадров теплового изображения) от 0.5 до 8 Гц;
- вывод на экран ПК одновременно теплового и видеоизображения диагностируемого участка;
- выделение на термограмме любого пикселя теплового изображения с указанием его координат и температуры (рис. 4). На рис. 4 представлен скриншот рабочего окна ПО "TermoLabs" с экрана ПК тепловизора. Слева выведена термограмма пальцев кисти. Крестиком отмечен выделенный пиксель теплового изображения, соответствующий лазерной

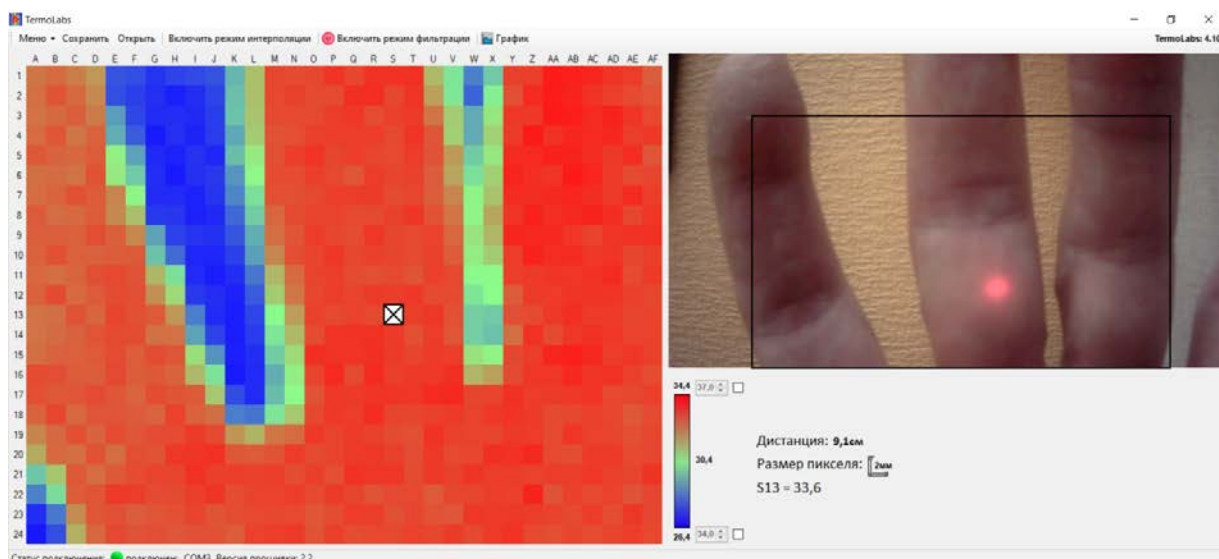


Рис. 4. Скриншот рабочего окна ПО "TermoLabs"

Fig. 4. Screenshot of the working window of the TermoLabs software

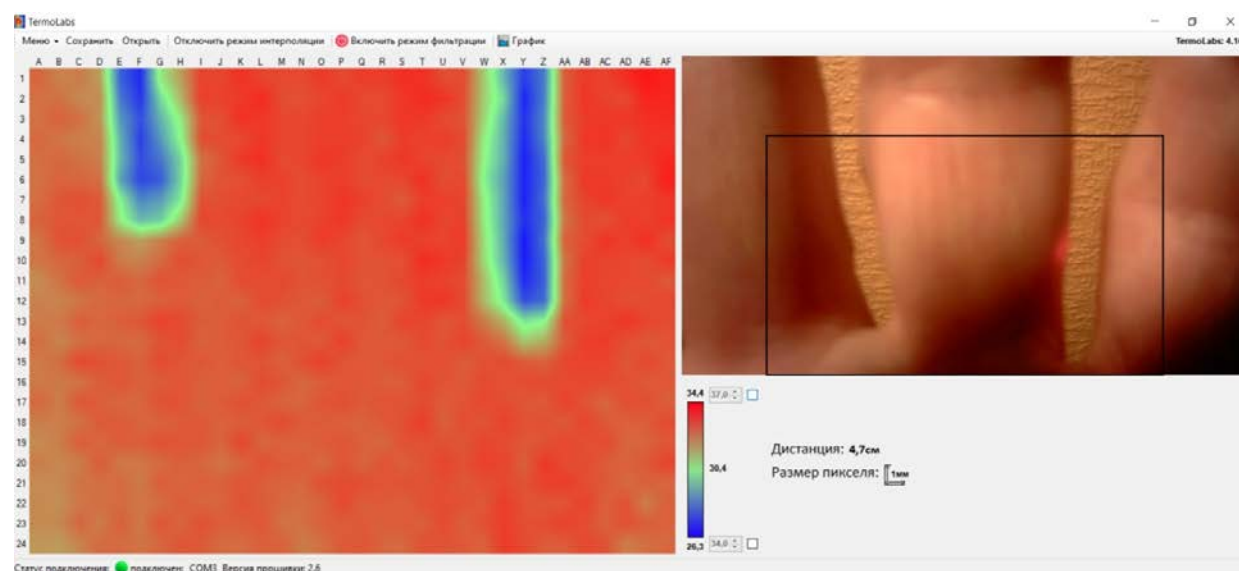


Рис. 5. Скриншот рабочего окна ПО "TermoLabs". Режим интерполяции

Fig. 5. Screenshot of the working window of the TermoLabs software

метке на видеоизображении одного из пальцев (справа). Ряд цифр (от 1 до 24) по вертикали термограммы, а также ряд букв (от A до AF) по горизонтали термограммы соответствуют формату МТД – 24 пикселя по вертикали и 32 пикселя по горизонтали. Это позволяет определить координаты любого пикселя на тепловом изображении диагностируемого участка путем наложения на него координатной сетки в формате *.xls. Черной рамкой на видеоизображении кисти отмечена область термографирования с лазерной меткой. На свободном поле справа указаны дистанция (расстояние) до точки измерения (9.1 см), соответствующий

этому расстоянию размер пикселя теплового изображения (2 мм), его координаты (S13) и температура (+33.6 °C), а также цветовая шкала температур с указанием автоматически заданного диапазона измеряемой температуры (+26.4...+34.4 °C) и средней температуры в диапазоне (+30.4 °C);

– суммирование до 10 кадров теплового изображения с усреднением температуры соседних пикселей с заданным в процентах отклонением (рис. 5). На рис. 5 слева выведена термограмма участка кисти в режиме интерполяции; пиксельная (дискретная) структура теплового изображения максимальна сглажена;

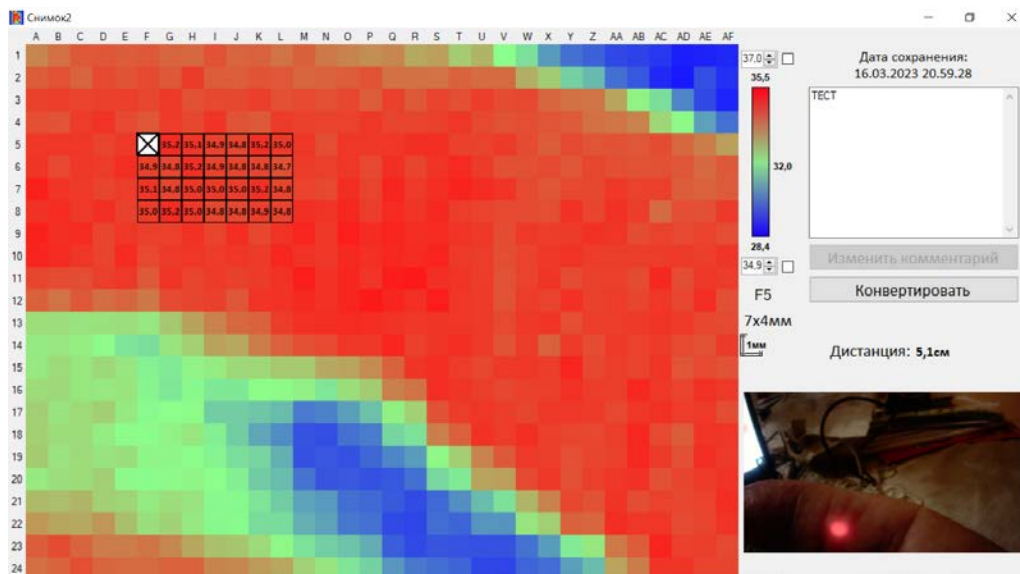


Рис. 6. Скриншот рабочего окна ПО "ТермоЛабс". Выделение цветом на термограмме зоны интереса

Fig. 6. Screenshot of the TernoLabs software working window.
Highlighting an area of interest in a thermogram

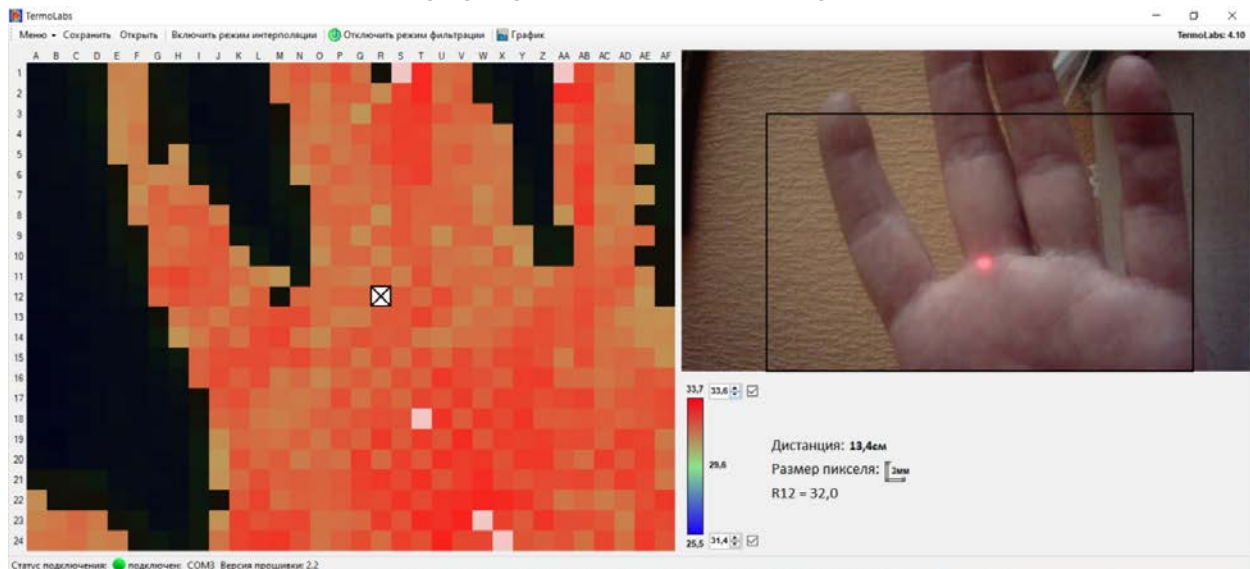


Рис. 7. Скриншот рабочего окна ПО "ТермоЛабс". Выделение интересующего температурного диапазона

Fig. 7. Screenshot of the working window of the TernoLabs software. Selecting the temperature range of interest

– выделение цветом на термограмме зоны интереса с точностью до одного пикселя теплового изображения и с определением его размеров в миллиметрах (рис. 6). На рис. 6 слева выведена термограмма участка кисти. Крестиком отмечен пиксель теплового изображения (координаты F5), соответствующий лазерной метке на видеоизображении этого участка (справа), и попиксельная матрица зоны интереса на тепловом изображении с указанием температуры в каждом пикселе. Справа указаны размеры зоны интереса в миллиметрах (7 × 4) и свободное поле "ТЕСТ" для занесения

Многofункциональный тепловизионный комплекс для медицинской диагностики
Multifunctional Thermal Imaging Complex for Medical Diagnostics

комментариев. Над этим полем указана дата их сохранения;

– выделение цветом интересующего температурного диапазона (рис. 7). На рис. 7 справа от цветовой шкалы в нижней рамке указана нижняя граница (+31.4 °C), в верхней рамке – верхняя граница (+33.6 °C) интересующего температурного диапазона. Конкретные значения температуры задаются вручную – нажатием на символ ☒. В этом случае участки термограммы ладони, температура которых ниже +31.4 °C, окрашены черным цветом, а участки, температура которых выше +33.6 °C, – розовым;

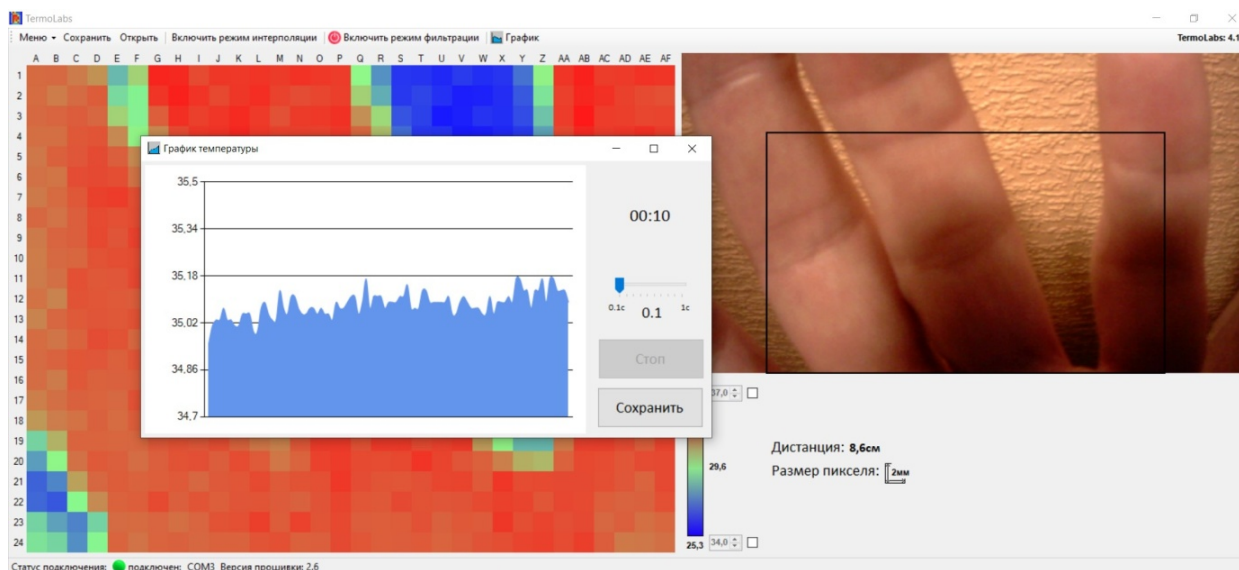


Рис. 8. Скриншот рабочего окна ПО "ТермоЛэбс". Отображение на экране ПК фиксируемого изменения температуры

Fig. 8. Screenshot of the working window of the TernoLabs software. Displaying recorded temperature changes on the PC screen

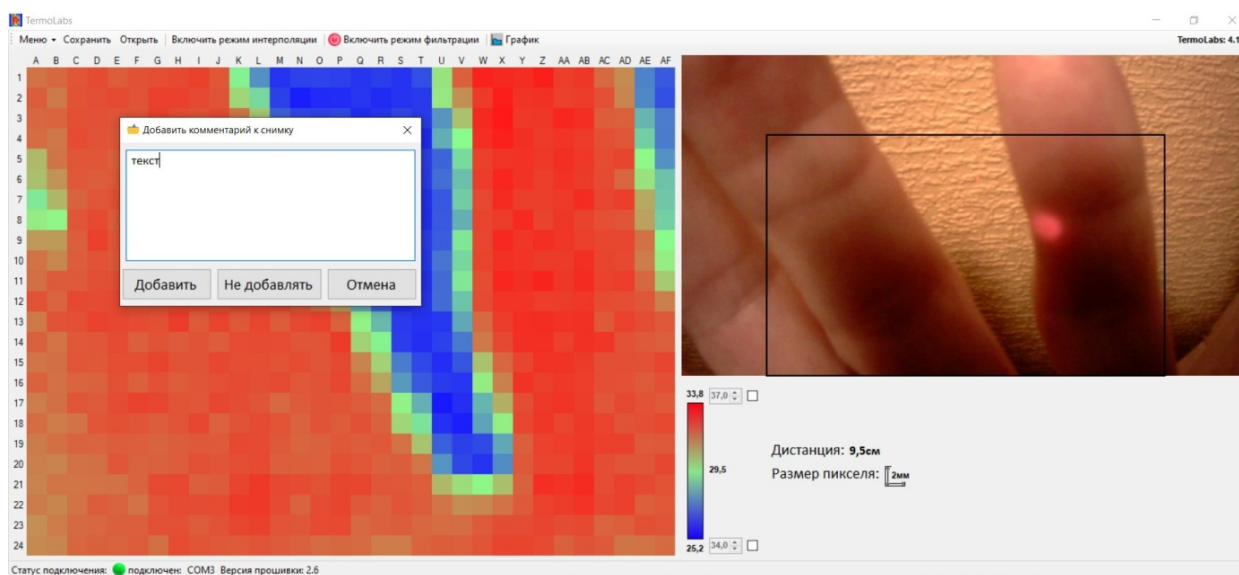


Рис. 9. Скриншот рабочего окна ПО "ТермоЛэбс". Комментарий информации по тепловизорграмме

Fig. 9. Screenshot of the working window of the TernoLabs software. Commentary on thermal imaging data

- отображение текущего размера пикселя теплового изображения;
- отображение на экране ПК фиксируемого изменения температуры (рис. 8). На рис. 8 слева выведено поле "График температуры", на котором зафиксированы результаты непрерывного по времени дискретного измерения температуры с помощью ТТД. Пауза между отдельными дискретными измерениями задается движком в диапазоне 0.1...1 с. В данном случае она составляет 0.1 с. Над движком отображается текущее время измерения;
- сохранение измеренных значений темпе-

ратуры в памяти ПК в заданных точках за установленное время;

- выведение на экран ПК видеоизображения участка объекта, по размерам совпадающего с тепловым изображением этого участка, с целью комментирования сохраненной информации (рис. 9). На рис. 9 слева выведено поле "Добавить комментарий к снимку" для занесения комментариев по результатам измерений температуры в пределах черной рамки на выделенном участке термографирования (справа).

В целом методика применения тепловизора предполагает:

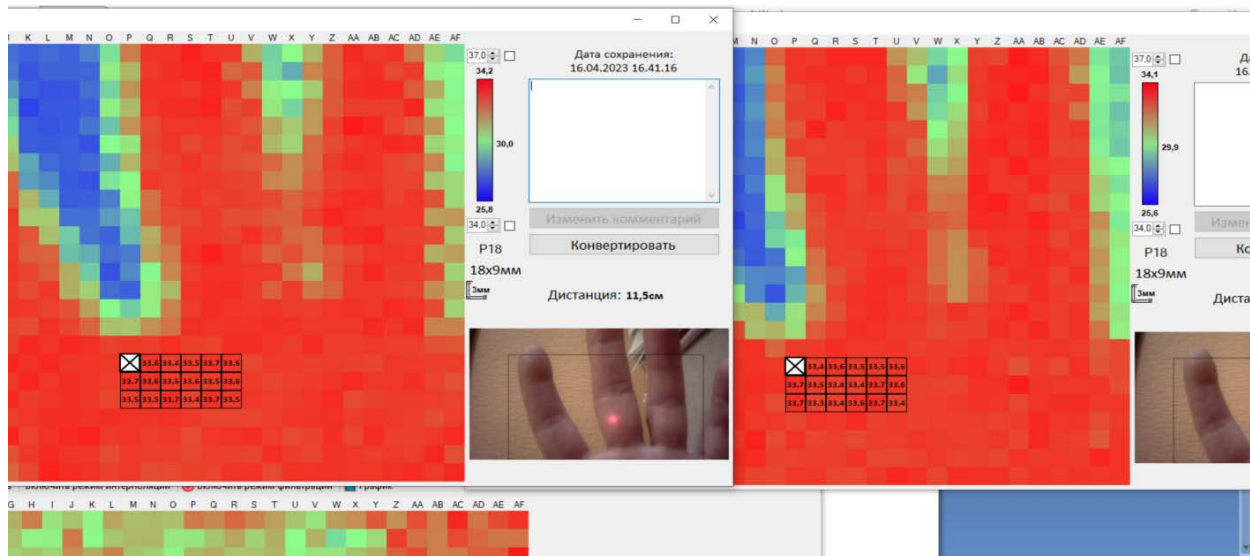


Рис. 10. Скриншот рабочего окна ПО "TermoLabs". Режим "Два окна"

Fig. 10. Screenshot of the TermoLabs software working window. "Two windows" mode

– для изучения статических источников тепла суммирование до 10 кадров теплового изображения при выбранной частоте регистрации;

– для изучения динамических тепловых процессов в реальном времени регистрирование серии термограмм за время нажатия кнопки фиксации с выбранной частотой регистрации.

Сохраненные в памяти ПК термограммы могут анализироваться в режиме двух окон на экране ПК (рис. 10).

Для удобства анализа, как уже отмечалось,

на термограмму может быть наложена в качестве координатной сетки матрица с указанием координат каждого пикселя сетки и его температуры (рис. 11).

Разработанное ПО ТВС-2 предоставляет возможность конвертирования тепловизионной информации, полученной с помощью МТД и ТТД, в формат *.xls для последующей статистической обработки (рис. 11).

Так, в тепловизионной матрице можно по строке или столбцу построить гистограмму

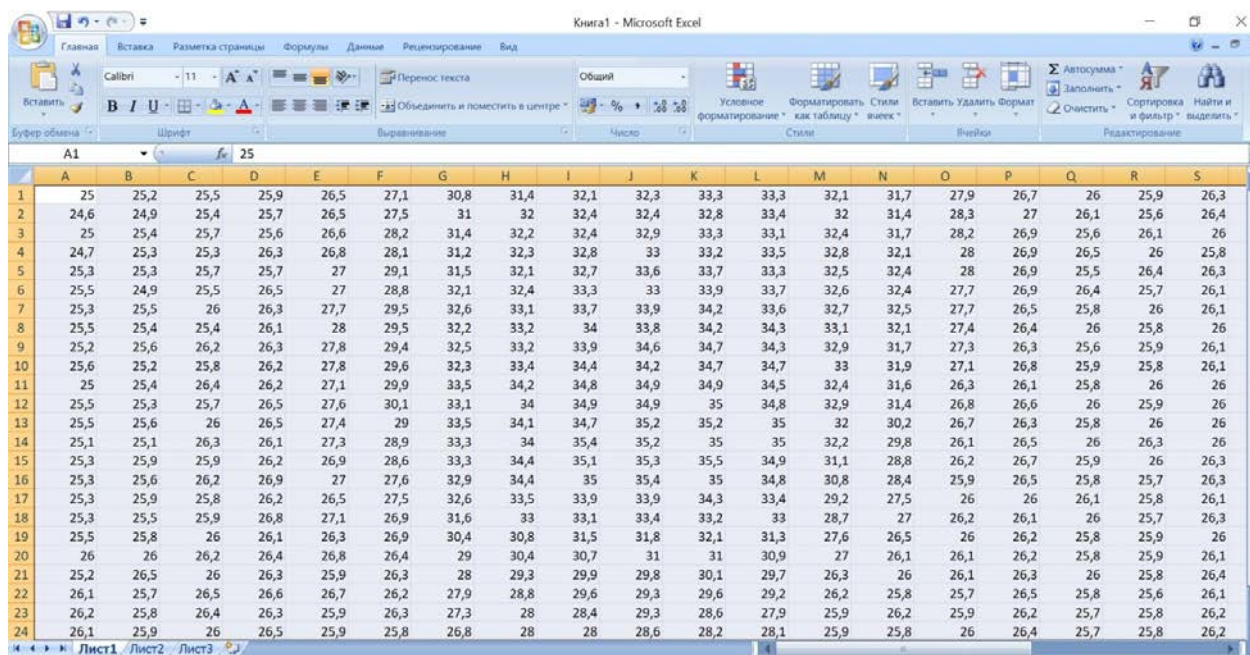


Рис. 11. Тепловизионная матрица в формате *.xls

Fig. 11. Thermal imaging matrix in *.xls format

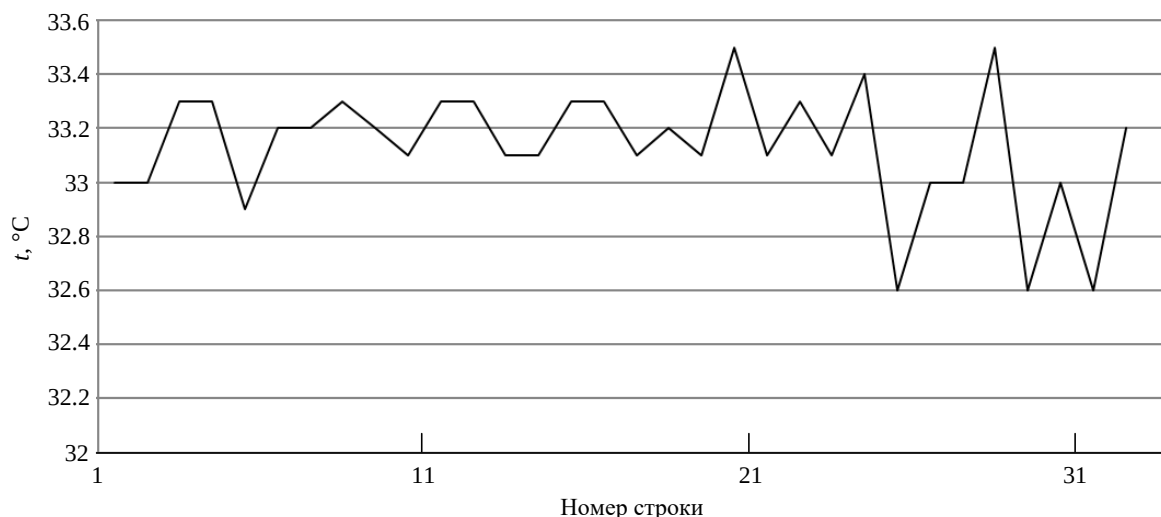


Рис. 12. Гистограмма распределения температуры по строке МТД

Fig. 12. Histogram of temperature distribution along the MTD line

распределения температуры и соотнести ее с предыдущей (исходной), сохраненной тепловизиограммой, пиксели которой тоже были представлены в координатах таблицы (рис. 12).

Точечный прецизионный датчик позволяет выполнить измерения температуры с большой точностью (0.02°C) и высокой скоростью (0.1 с). На рис. 12 в матрице выделена строка 11, по данным которой построена гистограмма попиксельного распределения температуры участка термографируемой поверхности в этом ряду.

На рис. 13 в виде графика представлены результаты прецизионного измерения температуры в центре лба добровольца с помощью ТТД.

Точность измерения составляет 0.02°C . Разница между отдельными измерениями – 0.01 с . Время измерения – 72 с . Расстояние от ТТД до

поверхности лба – 0.5 см и вычисленный диаметр точки, в которой измеряется температура – 0.1 см .

Матричные тепловизоры используются для оценки пульса [11]. Однако получение основных характеристик пульсовой волны требует достаточно сложной математической обработки полученных температурных данных [12–15]. Прецизионные измерения температуры тела пациента в динамике с помощью ТТД тепловизора ТВС-2 позволяют зафиксировать изменения температуры в момент прохождения пульсовой волны по артерии. Таким образом, возможно определить скорость кровотока прямым измерением (рис. 14). На рис. 14 представлен график изменения температуры над лучевой артерией на запястье руки добровольца. Пульс, оцененный по частоте температурных выбросов за время измере-

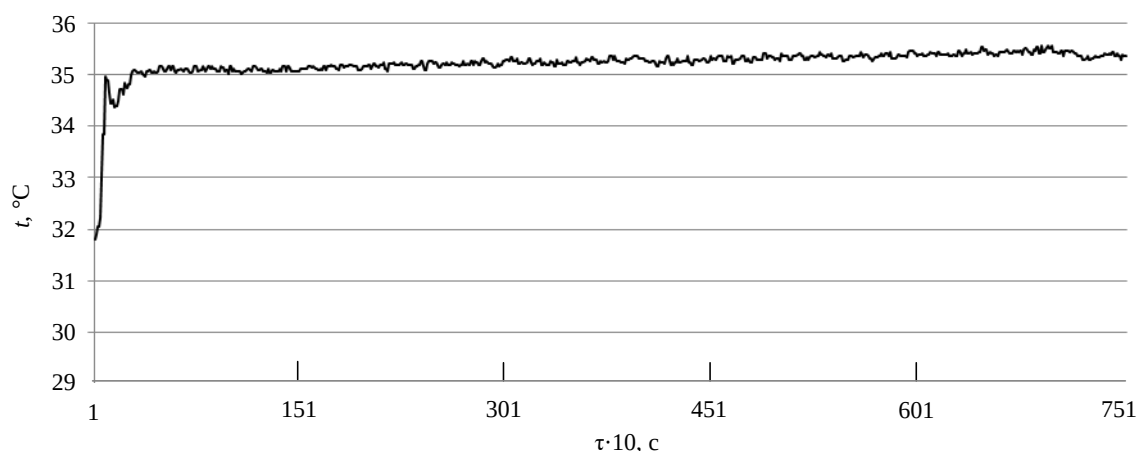


Рис. 13. Прецизионное измерение температуры с помощью ТТД

Fig. 13. Precise temperature measurement with TTD

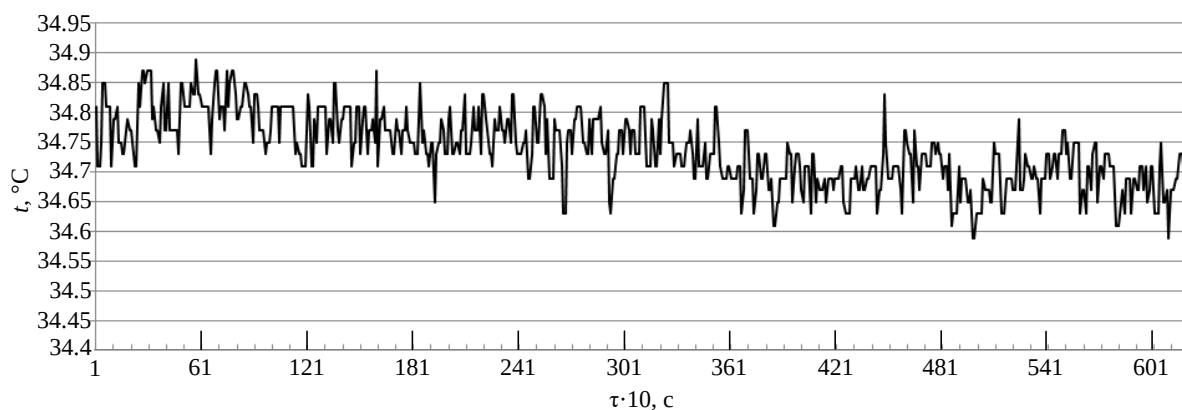


Рис. 14. Измерение пульса с помощью ТТД

Fig. 14. Pulse measurement using TTD

ния 62 с, составляет 81 уд./мин.

Испытания действующего макета тепловизора ТВС-2 были проведены в нескольких лечебно-профилактических учреждениях Санкт-Петербурга, в том числе ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова, НГУ им. П. Ф. Лесгафта и ВМА им. С. М. Кирова и показали его широкие функциональные возможности. Так, в НГУ им. П. Ф. Лесгафта ТВС-2 был использован при разработке методик определения степени подготовленности (квалификации) спортсменов в результате соответствующих тренировок. Специалисты ожогового центра ВМА им. С. М. Кирова успешно использовали макет тепловизора для изучения температурного поля в области предполагаемого некроза тканей с целью определения глубины ожогов или отморожений.

Выводы. В результате комплексных технических и медицинских исследований разработан первый отечественный многофункциональный тепловизионный комплекс в составе тепловизора ТВС-2, ПК и оригинального ПО для медицинской диагностики.

Комплекс обладает широкими функциональными возможностями и обеспечивает:

- регистрацию теплового и видеоизображения участка поверхности тела пациента с указанием температуры в каждом пикселе изображения;
- выделение на тепловом изображении участка зоны интереса с аномальными значениями температуры и ее подробное исследова-

ние путем задания диапазона температур для каждого пикселя изображения этой зоны;

- выведение на экран графика изменения температуры в точке интереса в реальном масштабе времени и с сохранением информации в таблице в формате *.xls;

- отображение на экране ПК одновременно нескольких последовательно полученных тепловых изображений для их анализа в динамике;

- занесение в память ПК и протоколирование всей необходимой информации о выполненном исследовании, включая ФИО пациента, время и дату, тепловые и видеоизображения, а также расстояние до диагностируемого участка, с соответствующими комментариями специалиста;

- представление результатов попиксельного измерения температуры зоны интереса в таблице в формате *.xls для их последующей статистической обработки.

Заключение. Предварительные испытания отечественного тепловизора ТВС-2 подтвердили его широкие функциональные возможности, в первую очередь получение точных количественных температурных характеристик тепловых процессов в статике и динамике. Простота эксплуатации по сравнению с импортными аналогами и отсутствие специальных требований к медперсоналу позволяют рассматривать его как эффективное и доступное средство исследования тепловых процессов в теле пациента, включая скрининговые исследования на первичном приеме.

Список литературы

1. Руководство по применению фирмы Flir. 2015. URL: <https://propribory.ru/static/upl/15-11-2019/uXmcDnOeRKyKUyiK/flir-e4-e5-e6-e8-e5xt-e6xt-e8xt->

manual.pdf?ysclid=m2cbmv2rld295973901 (дата обращения 16.10.2024)

2. Тепловидение в медицине: сравнительная оценка

инфракрасных систем диапазонов длин волн 3–5 и 8–12 мкм для диагностических целей / Г. Р. Иваницкий, Е. П. Хижняк, А. А. Деев, Л. Н. Хижняк // Докл. Академии наук. 2006. Т. 407, № 2. С. 258–262.

3. Место и роль дистанционной инфракрасной термографии среди современных диагностических методов / Ю. П. Дехтярев, В. И. Нечипорук, С. А. Мироненко, И. С. Ковальчук, Е. Ф. Венгер, В. И. Дунаевский, В. И. Котовский // Электроника и связь. Тематический вып. "Электроника и нанотехнологии". 2010. № 2. С. 192–196.

4. Методики и аппаратура неинвазивной оптической тканевой оксиметрии / А. И. Афанасьев, Д. А. Рогаткин, А. А. Сергиенко, В. И. Шумский // Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии / под ред. проф. А. Н. Малова. Иркутск: Папирус, 2008. С. 505–513.

5. Возможности медицинского тепловидения в обследовании и лечении пациентов с ожогами / М. Г. Воловик, И. М. Долгов, Ю. В. Карамышев, Ю. А. Лошенко, В. С. Коскин // Медицинский алфавит. 2023. № 22. С. 56–62. doi: 10.33667/2078-5631-2023-22-56-62

6. Вайнер Б. Г. Матричное тепловидение в физиологии: исследование сосудистых реакций, перспирации и терморегуляции у человека. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2004. 96 с.

7. Diakides N. A., Bronzino J. D. Medical Infrared Imaging. Boca Raton: CRC Press, 2008. 450 p.

8. Хижняк Л. Н., Хижняк Е. П., Маевский Е. И. Возможность применения миниатюрных инфракрасных камер нового поколения в медицинской диагностике // Вестн. новых медицинских техноло-

гий. 2018. Т. 25, № 4. С. 101–109. doi: 10.24411/1609-2163-2018-16279

9. Murthy R., Pavlidis I., Tsiamyrtzis P. Touchless monitoring of breathing function // Proc. of the 26th IEEE EMBS Annual Intern. Conf., San Francisco, USA, 01–05 Sept. 2004. IEEE, 2004. P. 228–231. doi: 10.1109/IEMBS.2004.1403382

10. Anbar M. Quantitative dynamic telethermometry in medical diagnosis and management. Boca Raton: CRC Press, 1994. 272 p.

11. Sun N., Pavlidis I. Counting heartbeats at a distance // Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual Intern. Conf., New York, USA, 30 Aug. –03 Sept. 2006. IEEE, 2006. P. 228–231. doi: 10.1109/IEMBS.2006.260596

12. StressCam: non-contact measurements of users' emotional states through thermal imaging / C. A. Puri, L. Olson, I. Pavlidis, J. Levine, J. Starren // Conf. for computer–human interaction (CHI), Portland, Oregon, USA, 2–7 Apr. 2005. P. 1725–1728. doi: 10.1145/1056808.1057007

13. Pavlidis I., Levine J. Monitoring of periorbital blood flow rate through thermal image analysis and its applications to polygraph testing // Conf. Proc. of the 23rd Annual Intern. Conf. of the IEEE Eng. in Medicine and Biology Society. Istanbul, Turkey, 25–28 Oct. 2001. IEEE, 2001. Vol. 3. P. 2826–2829. doi: 10.1109/IEMBS.2001.1017374

14. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions // J. of Experimental Psychology. 1992. Vol. 121, iss. 1. P. 15–23. doi: 10.1037/0096-3445.121.1.15

15. Воловик М. Г., Долгов И. М. Современные возможности и перспективы развития медицинского тепловидения // Медицинский алфавит. 2018. Т. 3, № 25. С. 45–51.

Информация об авторах

Потрахов Николай Николаевич – доктор технических наук (2009), доцент (2021), заведующий кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – методики применения рентгеновского излучения в различных областях и технические средства для их реализации.

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

E-mail: nnpotrahov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Ростачев Сергей Александрович – специалист по направлению "Физика" (1976, Уральский государственный университет им. А. М. Горького), инженер кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – специалист в области разработки методик применения тепловизионных комплексов для целей медицинской диагностики.

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

E-mail: rsaserge@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3377-3179>

Ладожская-Гапеев Екатерина Евгеньевна – кандидат медицинских наук (2023), младший научный сотрудник НКЦ анестезиологии и реаниматологии, анестезиолог-реаниматолог АиР № 2 Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова. Автор 9 патентов на изобретение. Сфера научных интересов – вопросы диагностики состояния микроциркуляции у пациентов в критическом состоянии, разработка методов улучшения системного микрокровотока.

Адрес: Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, ул. Льва Толстого, д. 6/8, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: ulfkote@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6084-7030>

Гук Карина Константиновна – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – методики применения рентгеновского излучения в различных областях.

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

E-mail: kkguk@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4968-7857>

References

1. Flir User Manual. Available at: <https://propribory.ru/static/upl/15-11-2019/uXmcDnOeRKYKUyiK/flir-e4-e5-e6-e8-e5xt-e6xt-e8xt-manual.pdf?ysclid=m2cbmv2rld295973901> (accessed 16.10.2024)
2. Ivanitsky G. R., Khizhnyak E. P., Deev A. A., Khizhnyak L. N. Thermal Imaging in Medicine: A Comparative Study of Infrared Systems Operating in Wavelength Ranges of 3–5 and 8–12 μm as Applied to Diagnosis. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2006, vol. 407, pp. 59–63. doi: 10.1134/S1607672906020049
3. Dehtjarev Yu. P., Nechiporuk V. I., Mironenko S. A., Koval'chuk I. S., Venger E. F., Dunaevskij V. I., Kotovskij V. I. Mesto i rol' distancionnoj infrakrasnoj termografii sredi sovremennyh diagnosticheskikh metodov [The Place and Role of Remote Infrared Thermography Among Modern Diagnostic Methods]. *Elektronika i svjaz'. Tematicheskij vypusk "Elektronika i nanotehnologii"*. 2010, no. 2, pp. 192–196. (In Russ.)
4. Afanas'ev A. I., Rogatkin D. A., Sergienko A. A., Shumskii V. I. *Metodiki i apparatura neinvazivnoi opticheskoi tkanevoi oksimetrii* [Methods and Equipment for Non-Invasive Optical Tissue Oximetry]. Ed. by Prof. A. N. Malov. Proc. of the XXVI School on Coherent Optics and Holography. Irkutsk, Papyrus, 2008, pp. 505–513. (In Russ.)
5. Volovik M. G., Dolgov I. M., Karamyshev Yu. V., Loshenko I. A., Koskin V. S. Medical Thermography as a Method to Assessment of Burn Depth and Treatment Effectiveness in Patients with Burn Injury. *Medical Alphabet*. 2023, no. 22, pp. 56–62. (In Russ.) doi: 10.33667/2078-5631-2023-22-56-62
6. Vajner B. G. *Matrichnoe teplovidenie v fiziologii: issledovanie sosudistyh reakcij, perspiracii i termoreguljacii u cheloveka* [Matrix Thermal Imaging in Physiology: Study of Vascular Reactions, Perspiration and Thermoregulation in Humans]. Novosibirsk, Izd-vo Sib. otd. RAN, 2004, 96 p. (In Russ.)
7. Diakides N. A., Bronzino J. D. *Medical Infrared Imaging*. Boca Raton, CRC Press, 2008, 450 p.
8. Khizhnyak L. N., Khizhnyak E. P., Maevsky E. I. The Possibilities of Using Miniature Infrared Cameras a New Generation for Medical Diagnostics. *J. of New Medical Technologies* 2018, vol. 25, no. 4, pp. 101 – 109. doi: 10.24411/1609-2163-2018-16279 (In Russ.)
9. Murthy R., Pavlidis I., Tsiamyrtzis P. Touchless Monitoring of Breathing Function. Proc. of the 26th IEEE EMBS Annual Intern. Conf., San Francisco, USA. 01–05 Sept. 2004. IEEE, 2004, pp. 228–231. doi: 10.1109/IEMBS.2004.1403382
10. Anbar M. Quantitative Dynamic Telethermometry in Medical Diagnosis And Management. Boca Raton, CRC Press, 1994, 272 p.
11. Sun N., Pavlidis I. Counting Heartbeats at a Distance. Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual Intern. Conf., New York, USA. 30 Aug. –03 Sept. 2006. IEEE, 2006, pp. 228–231. doi: 10.1109/IEMBS.2006.260596
12. Puri C. A., Olson L., Pavlidis I., Levine J., Starren J. StressCam: Non-Contact Measurements of Users' Emotional States through Thermal Imaging. Conf. for Computer–Human Interaction (CHI), Portland, Oregon, USA. 2–7 Apr. 2005, pp. 1725–1728. doi: 10.1145/1056808.1057007
13. Pavlidis I., Levine J. Monitoring of Periorbital Blood Flow Rate Through Thermal Image Analysis and Its Applications to Polygraph Testing. Conf. Proc. of the 23rd Annual Intern. Conf. of the IEEE Eng. in Medicine and Biology Society. Istanbul, Turkey. 25–28 Oct. 2001. IEEE, 2001, vol. 3, pp. 2826–2829. doi: 10.1109/IEMBS.2001.1017374
14. Stroop J. R. Studies of Interference in Serial Verbal Reactions. *J. of Experimental Psychology*. 1992, vol. 121, iss. 1, pp. 15–23. doi: 10.1037/0096-3445.121.1.15
15. Volovik M. G., Dolgov I. M. Current Status and Perspectives for the Development of Medical Thermal Imaging. *Medical Alphabet*. 2018, vol. 3, no. 25, pp. 45–51. (In Russ.)

Information about the authors

Potrakhov Nikolay Nikolaevich – Dr Sci. (2009), Head of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: methods of using x-ray radiation in various fields and technical means for their implementation.

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

E-mail: nnpotrakhov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Rostachev Sergey Aleksandrovich – Specialist in physics (1976, Ural State University), Engineer of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: specialist in the development of methods for using thermal imaging systems for medical diagnostic purposes. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: rsaserge@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3377-3179>

Ekaterina E. Ladozhskaya-Gapeenko, Cand. Sci. (Med.) (2023), Junior Researcher of Scientific and Clinical Center of Anesthesiology and Resuscitation, Anesthesiologist-Resuscitator of the A&R Department no. 2 of the Academician I. P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. Author of 9 patents for invention. Research interests include issues of diagnosing the state of microcirculation in critically ill patients, and developing methods to improve systemic microcirculation.
Address: Academician I. P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6/8, Lev Tolstoy St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ulfkote@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6084-7030>

Guk Karina Konstantinovna – Cand. Sci. (2016), Associate Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: methods of using x-ray radiation in various fields.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: kkguk@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4968-7857>

Адаптивный к траектории скважины универсальный гиросинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости

Я. И. Биндер, И. А. Хазов ✉

АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации",
Санкт-Петербург, Россия

✉ IvanHazov@okb3d.com

Аннотация

Введение. Развивается подход к построению гироскопического инклинометра (ГИ) на основе одного одноосного датчика угловой скорости (ДУС). Констатируется, что такой ГИ следует считать модификацией продольной схемы, сохраняющей известный недостаток тактико-технических характеристик – отсутствие адаптивности к траектории, т. е. соизмеримости погрешностей ГИ при различных зенитных углах. Следующий значимый шаг в развитии схемы с одним ДУС является задачей настоящей работы – это кратное повышение точности измерения азимута для вертикальных и "прилегающих к вертикали" скважин при работе ГИ в непрерывном режиме.

Цель работы. Придание ГИ на базе одноосного ДУС свойства адаптивности к траектории скважины: конструктивная модификация, сравнительный анализ ошибок.

Материалы и методы. Алгоритмы идеальной работы новой схемы в непрерывном режиме синтезируются на основе матричных преобразований координат и уравнений Эйлера. При анализе свойств ошибок ориентации используются методы линеаризации, интегральное исчисление, основы вариационного исчисления и теория линейных дифференциальных уравнений.

Результаты. Придание модифицированной схеме ГИ свойства адаптивности к траектории достигнуто за счет предусмотренного в конструкции отклонения положения оси чувствительности ДУС на некоторый угол неортогональности к продольной оси ГИ. При проектировании ГИ на базе развитого подхода удается реализовать значение этого угла 20° , что обеспечивает эффективный уровень адаптивности к траектории ствола в непрерывном режиме, а увеличение погрешности компасирования не выходит за рамки неопределенности статистических характеристик дрейфа ДУС.

Заключение. Разработанная схема ГИ позволяет в несколько раз снизить влияние дрейфа ДУС на точность выработки азимута в зоне переходных зенитных углов (от "вертикальных" стволов к наклонно направленным) по сравнению с известной точностью для "продольной" схемы, сохраняя тем самым в процессе движения в скважине повышенную точность начальной выставки в ее устье.

Ключевые слова: гиросинклинометр, модификация продольной схемы, классификация скважин, одноосный индикаторный гиросtabilизатор, одноосный ДУС, неортогональное положение, измерительная ось

Для цитирования: Биндер Я. И., Хазов И. А. Адаптивный к траектории скважины универсальный гиросинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 91–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-91-107

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 31.03.2024; принята к публикации после рецензирования 16.05.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor

Yakov I. Binder, Ivan A. Khazov ✉

"Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

Abstract

Introduction. An approach to designing a gyroscopic inclinometer (GI) based on a single uniaxial angular rate sensor (ARS) is developed. It is argued that such an ARS should be considered a modification of a longitudinal GI scheme, preserving the well-known disadvantages of its performance characteristics. The latter include a lack of adaptability to the trajectory, i.e., commensurability of GI errors at different zenith angles. This work sets out to develop a scheme with one ARS in order to achieve a multiple increase in the accuracy of azimuth measurements for vertical and adjacent-to-the-vertical boreholes when the GI is operated in continuous mode.

Aim. To make a GI based on a uniaxial angular velocity sensor more adaptive to the borehole trajectory through its design modification and a comparative analysis of errors.

Materials and methods. Algorithms for ideal operation of the proposed scheme in continuous mode are synthesized based on matrix transformations of coordinates and Euler equations. The properties of orientation errors are examined using linearization methods, integral calculus, fundamentals of the calculus of variations, and the theory of linear differential equations.

Results. The adaptivity of the modified GI scheme to the borehole trajectory was achieved by means of a structurally provided deviation of the ARS sensitivity axis by a certain angle of non-orthogonality to the GI longitudinal axis. When designing a GI based on the developed approach, it is possible to realize the value of this angle of 20°. For this angle, the increase in the compassing error does not exceed the uncertainty of the ARS drift statistical characteristics, while achieving an effective level of adaptivity to the borehole trajectory in continuous mode.

Conclusion. The developed scheme makes it possible to significantly reduce the influence of the ARS drift on the accuracy of azimuth calculation in the transitional zenith angles area (from vertical to directional boreholes) in comparison with the well-known longitudinal scheme, thereby maintaining an increased initial azimuth accuracy during movement in the initial alignment at the wellhead.

Keywords: gyro inclinometer, longitudinal scheme modification, borehole classification, uniaxial gyrostabilizer, uniaxial ARS, non-orthogonal position, measuring axis

For citation: Binder Ya. I., Khazov I. A. A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 91–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-91-107

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

Submitted 31.03.2024; accepted 16.05.2024; published online 29.11.2024

Введение. Настоящая статья является продолжением и развитием работы [1], в которой была предложена принципиальная новация, позволяющая, по сути, реализовать "продольную" (ХУ) схему [2–4] универсального гироскопического инклинометра (ГИ) на одном одноосном датчике угловой скорости (ДУС), одновременно (и существенно) повышая ее надежность и снижая стоимость.

Под схемой ХУ (продольной) понимается кинематическая схема ГИ, в которой измерительные оси двухосного (двух одноосных) ДУС расположены перпендикулярно продольной оси прибора (вектор кинетического момента гироскопа, при его наличии, направлен вдоль продольной оси ГИ).

Отличительные признаки предложенного в [1] устройства:

– в режиме гироскопирования (ГК) одно-временные измерения ортогональных проекций горизонтальной составляющей скорости суточного вращения Земли ДУС заменены последовательными, проводимыми единственным одноосным датчиком, как и ранее установленным на поворотной относительно продольной оси скважинного прибора (СП) рамке, при ее положениях, кратных 90° ;

– в режиме непрерывной съемки введен режим грубой стабилизации оси чувствительности ДУС около апсидальной плоскости с помощью привода подвижной рамки, ранее использовавшейся только для обеспечения ГК, по информации установленных на ней акселерометров и/или датчика угла поворота.

Как отмечено в [1], основным фактором, определившим целесообразность реализации предложенной схемы ГИ, является появление на рынке обладающих высокой стабильностью одноосных кольцевых вибрационных гироскопов (КВГ) с резонатором индукционного типа, выполненным в соответствии с MEMS-технологией. За счет указанного исполнения такие гироскопы обладают перегрузочной способностью, характерной для твердотельных чувствительных элементов (ЧЭ). Эти качества сделали возможной реальную универсализацию применения предложенного технического решения, в том числе, как описано в [1], пригодность такого ГИ для проведения операций по зарезке боковых стволов (бурению одного или нескольких боковых стволов из ранее пробуренного вертикального).

Также необходимо отметить, что кроме продольного (ХУ) возможно исполнение ГИ, в котором измерительная ось ДУС (или одна из осей) направлена вдоль продольной оси инклинометра (может быть реализована как на отдельной гиростабилизированной платформе, так и в бесплатформенном варианте, когда ДУС жестко связан с корпусом ГИ) – так называемая схема Z, более подробно рассмотренная далее.

Цель работы. В [1] отмечено, что у предложенного ГИ сохраняется зависимость точности съемки от траектории скважины, свойственная приборам, построенным по продольной схеме. В частности, на участках ствола, близких к вертикали, определение азимуталь-

ной ориентации ГИ в непрерывном режиме неустойчиво независимо от принятой системы координат [2]. Реализованные ранее группой специалистов во главе с одним из авторов настоящей статьи методические и конструктивные решения [2, 3], опирающиеся на использование дополнительного грубого z-MEMS-гироскопа, позволили уменьшить эту зависимость, но полностью ее не устранили.

Настоящая статья посвящена, как и было анонсировано в [1], дальнейшей трансформации предложенного там технического решения с целью достижения адаптивности процесса съемки скважины к ее траектории, т. е. соизмеримости погрешностей ГИ при различных зенитных углах, и, прежде всего, обеспечения устойчивости определения азимутальной ориентации ГИ на вертикальных участках скважин за счет придания ему некоторых качеств, свойственных схеме Z.

Съемка стволов произвольной ориентации. Этой теме уделено достаточное внимание в работе [2], основные положения которой до сих пор не потеряли актуальности. В то же время, приобретенный опыт и практические результаты изучения вопроса, вынесенного в подзаголовок, оправдывают и несколько иной ракурс его изложения.

Выходными параметрами непрерывного ГИ являются декартовы координаты r_E , r_N , r_h точек траектории скважины в географической системе координат ENh (рис.1, a , b , ось E направлена на восток, N – на север, h – по вертикали места, точка O расположена в устье скважины), рассчитываемые классическим методом навигационного счисления, при котором приращения показаний одометра (длины геофизического кабеля, троса и т. д.) раскладываются по осям навигационного базиса и затем последовательно суммируются (интегрируются). Для этого ГИ вырабатывает матрицу C_h^O направляющих косинусов, характеризующих ориентацию системы координат xuz , связанной со скважинным прибором, относительно географической системы:

$$C_h^O = \begin{bmatrix} x & y & z \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{matrix} E \\ N \\ h \end{matrix} \quad (1)$$

На основании элементов матрицы (1) и информации о приращении длины кабеля L в непрерывном ГИ вычисляются искомые координаты траектории скважины:

$$r_E = \int_0^L c_{13} dl; \quad r_N = \int_0^L c_{23} dl; \quad r_h = \int_0^L c_{33} dl. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2), оперирующие направляющими косинусами, имеют универсальный характер. Тем не менее, на рис. 1, *а* дана их кинематическая интерпретация в классических углах Эйлера [5], традиционно используемых в инклинометрии: A – угол азимута (угол между плоскостью географического меридиана в точке измерения и апсидальной плоскостью, проходящей через оси Oz и Oh); θ – зенитный угол (угол между осями Oz и h); ψ – угол отклонителя (угол между главной полуплоскостью инклинометра, проходящей через оси Oz и Oy , и апсидальной плоскостью). На рис. 1, *б* кинематическая интерпретация дана в углах μ , ν и Φ , введенных ранее в [2, 4] для описания вертикальных скважин (из-за вырождения угла азимута при малых зенитных углах) (угол μ соответствует повороту ГИ в плоскости меридиана, угол ν – повороту в плоскости, перпендикулярной плоскости меридиана, угол Φ – повороту вокруг собственной оси). Связано это с использованием измерителя ускорений (ИУ) в качестве маятни-

кового угломера. Возможность использования ИУ в таком режиме (см., например, [2]) обусловлена, прежде всего, жестким ограничением линейных перемещений корпуса прибора в плоскости поперечного сечения скважины.

Такой подход является важнейшим системообразующим фактором скважинной навигации, уводящим ее от неоправданного использования в инклинометрии алгоритмов инерциальных навигационных систем, оперирующих понятием кажущегося ускорения. Это позволяет оптимизировать состав используемых ЧЭ за счет частичной замены сложных и дорогостоящих ДУС на гораздо более доступные во всех отношениях акселерометры. Однако именно такое замещение порождает зависимость эффективности решения задачи от ориентации ствола скважины, так как по мере его приближения к вертикали свойства маятникового угломера вырождаются (ИУ не чувствителен к азимутальным разворотам).

Возвращаясь к (1), варьируем ее для определенности в углах Эйлера (рис.1, *а*) и вычислим модуль вектора ошибки ориентации, соответствующий градиенту суммарного промаха в определении местоположения точки траектории вдоль оси скважины:

$$\Delta c_0 = \sqrt{\Delta c_{13}^2 + \Delta c_{23}^2 + \Delta c_{33}^2} = \sqrt{(\Delta A \sin \theta)^2 + \Delta \theta^2}. \quad (3)$$

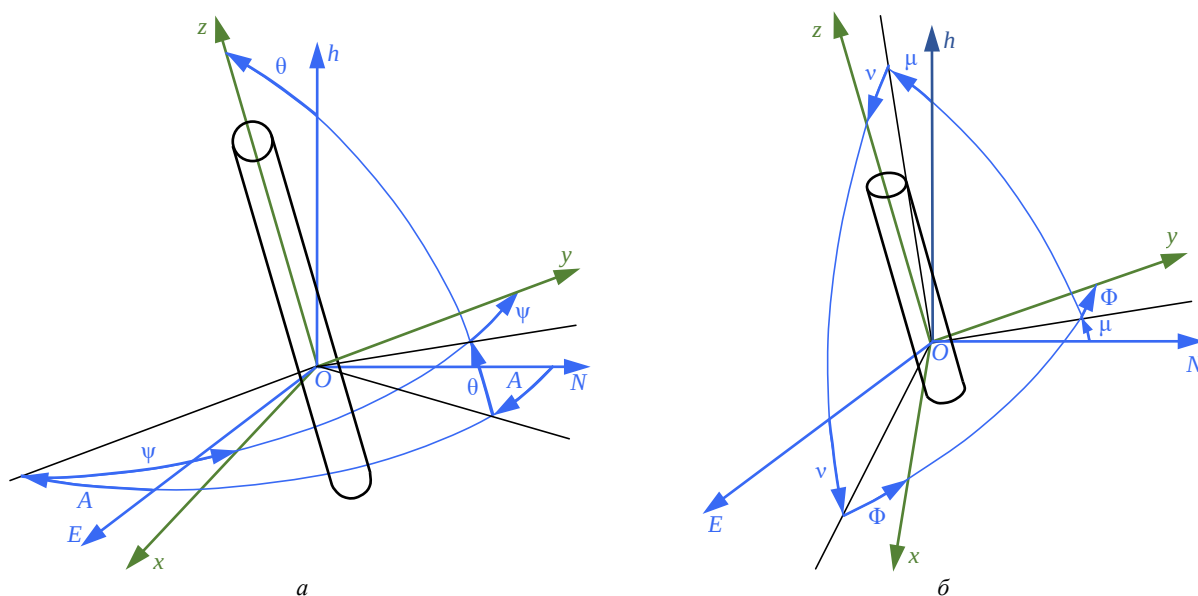


Рис. 1. Ориентация географической (ENh) и связанной с корпусом СП (xyz) систем координат: *а* – в углах Эйлера; *б* – для съемки вертикальных скважин

Fig 1. Orientation of geographic (ENh) and associated with the inclinometer (xyz) coordinate systems: *а* – in Euler angles; *б* – for vertical borehole surveying

При всем многообразии видов траекторий скважин, встречающихся на практике, их типизация с точки зрения инклинометрической съемки вполне исчерпывающая.

Согласно принятой в нефтегазовой отрасли классификации [6–9]:

- к вертикальным относят скважины, угол отклонения ствола которых от вертикали не превышает 5°;

- к наклонно направленным относят скважины, угол отклонения которых от вертикали больше 5...6°;

- горизонтальная скважина – это скважина, интервал вскрытия которой в 2 и более раза превышает толщину пласта.

Приведенные определения следует иметь в виду, чтобы не утратить связь между буровой практикой и гироинклинометрической съемкой.

В настоящей статье в интересах гироинклинометрической съемки скважины будут классифицированы следующим образом:

- тип I (строго вертикальные, рис. 2, а);
- тип S (наклонно-вертикальные, рис. 2, б);
- тип L (наклонно-горизонтальные, рис. 2, в).

Для строго вертикальных скважин (тип I) $r_h \gg \sqrt{r_E^2 + r_N^2}$. Это быстро развивающийся в нынешнем веке тип скважин, необходимых при замораживании горных пород [10–13] в целях создания, в частности, подземных хранилищ. Бурение таких скважин сопровождается, как правило, использованием для измерений в процессе бурения (measurement while drilling – MWD) магнитных или – в особо ответственных случаях – гироскопических инклинометров,

важной, но все-таки вспомогательной функцией которых является определение азимутального направления отклонения точек ствола от вертикали. Оно необходимо для эффективного устранения этого отклонения θ (проектное значение зенитного угла при бурении таких скважин 0°), точное измерение которого становится основной функцией инклинометрии. На практике при разбуривании I-скважин в режиме MWD значения θ и погрешности его измерений соизмеримы. При этом погрешность, для всех применяемых на практике ГИ формируемая погрешностями ИУ, определяет значение Δc_0 . В таком случае для I-скважин описывать размер пространственного промаха удобнее с использованием углов μ и ν (рис. 1, б):

$$\Delta c_0 = \sqrt{\Delta \nu^2 + \Delta \mu^2}.$$

Длительность режима MWD, определяемая скоростью проходки достаточно глубоких (до 1 км) скважин, может потребовать использования для азимутальных измерений точечного компасирования, во всяком случае, в качестве базового. Последнее обстоятельство, несмотря на, казалось бы, пониженные требования к точности оценки азимута, определяет необходимость использования ДУС, обеспечивающего ГК (см. аналогичные пояснения для зарезки боковых стволов в [1]).

Для глубоких (1 км и более) скважин других типов в корректно спроектированных системах гироскопической навигации слагаемые под знаком корня в (3) должны (в среднем по траектории) различаться существенно, но уже в пользу первого из них. В настоящее время успехи в со-

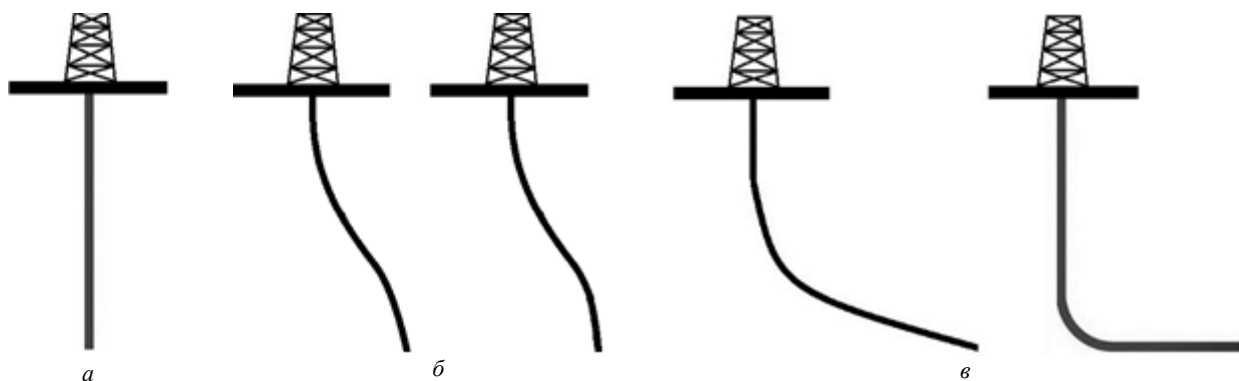


Рис. 2. Варианты профилей скважин: а – строго вертикальная (тип I); б – наклонно-вертикальные (тип S); в – наклонно-горизонтальные (тип L)

Fig. 2. Borehole profiles: а – vertical (type I); б – inclined-vertical (type S); в – slant and horizontal (type L)

здании и широком внедрении доступных MEMS-акселерометров, соответствующих требованиям к системам навигационно-тактического класса, сделали из такой тенденции норму. Именно поэтому параметр бокового промаха

$$\alpha = \Delta A \sin \theta \quad (4)$$

для скважин произвольной ориентации является определяющим, а приближенное значение оценки самого бокового промаха, как нетрудно убедиться, будет иметь вид

$$\Delta_{xy} = v_z \int_0^t \alpha \, dt, \quad (5)$$

где v_z – скорость спуска/подъема ГИ в скважине.

Возможные последовательность и градиенты зенитных углов в пределах одного ствола, в отличие от его азимутального направления, которое может быть любым, определяются не только условиями физической и технической реализуемости. Несмотря на большое разнообразие инженерно-геологических задач, возникающих при строительстве скважин, закономерности изменчивости траекторий их стволов (профиля) вполне подчиняются принципам, положенным в основу введенной на рис. 2 классификации (I, S, L). Однако для использования этой классификации при аналитических оценках, в том числе для сравнительного анализа эффективности съемки, необходимо ввести параметры профилей и соответствующие им количественные критерии.

В качестве такого параметра может быть предложено средневзвешенное значение синуса зенитного угла:

$$\sin \theta_{cp} = \frac{v_z}{L} \int_0^t \sin \theta \, dt. \quad (6)$$

Физический смысл (6) вполне очевиден для тривиальной модели погрешности азимута, определяемой главным образом ее начальным значением ΔA_0 . Имея в виду (4) и (5), получим ожидаемое определение бокового промаха:

$$\Delta_{xy} = \Delta A_0 L \sin \theta_{cp}. \quad (7)$$

В режиме так называемой точно-непрерывной съемки [14] ошибка построения траектории определяется погрешностью точечного ГК, а

допустимые интервалы между остановками – погрешностями гироазимутального режима. При этом получаемые по (7) точные значения заменяются среднеквадратическими отклонениями (СКО), полученными к текущему моменту. В последней оценке необходимо учитывать также искажения, обусловленные зависимостью эффективности ГК от ориентации скважины [15].

Как и любой эмпирический параметр, величина (6) не учитывает всех условий характеризуемой процедуры. Так, в нем не учитывается, что вместе с ростом θ обычно возрастает значение ΔA и его значимость для контроля бокового промаха при больших зенитных углах (5). Возможны и иные замечания, но, как показывает опыт, по совокупности простоты и наглядности оценки, с одной стороны, и ее эффективности, с другой – критерий (6) можно считать приемлемым.

В практике глубокого (более 1 км) бурения принято считать наклонно направленным ствол с зенитным углом более 6° . При строительстве всех известных авторам разновидностей скважин типа S значительную долю общей наклонной длины L (20 %) занимает номинально вертикальное бурение (например, под кондуктор), после которого обычно начинается набор кривизны с выходом на условно прямолинейный участок (см. рис. 2, б), причем таких участков может быть несколько. Поэтому скважины, выходящие по мере приближения к забою на зенитные углы 45° и более, вполне могут быть отнесены к этой (S) градации при выборе значения $\sin \theta_{cp} = 0.5$. Съемка стволов типа S в современной геофизической практике встречается чаще всего, что обусловлено как огромным фондом скважин, пробуренных еще в XX в. и подлежащих реновации (капитальному ремонту, резке боковых стволов, кустовому разбуриванию [16–18]), так и сравнительной простотой их бурения в современных условиях. Это позволяет вести разработку месторождений не очень крупным добывающим и буровым компаниям, которые не в состоянии освоить технологии строительства горизонтальных скважин.

Наиболее органичной для непрерывной съемки стволов, "прилегающих к вертикали" (в терминологии настоящей статьи, профилей типа S), выглядит измерение ДУС угловой скорости

вокруг оси скважинного прибора (схема Z [2, 19]). Однако критерий "прилегания" при этом не формулировался и не обосновывался. В рамках используемой в настоящей статье инклинометрической классификации его можно конкретизировать, введя, в соответствии с изложенным, условие $\sin \theta_{\text{ср}} = 0.5$. Более детальное рассмотрение критериев предложенной в настоящей статье классификации скважин, используемой в качестве основы для рубрикации материалов исследования, выходит за ее рамки.

Примеры реализации схемы Z крайне малочисленны в силу целого комплекса причин как инженерного, так и принципиального свойства. Дело в том, что угловая скорость вращения по углу отклонителя ψ , которую необходимо измерять в такой схеме, на 3...4 порядка выше, чем определяемые скоростью проведения спуско-подъемных операций v_z и кривизной стволов составляющие угловой скорости по осям x и y . Поэтому для реализации по такой схеме бесплатформенного ГИ нужны уникальные ДУС, сочетающие достаточно высокую точность с указанным широким диапазоном измерения. Некий паллиатив бесплатформенного Z, реализованный в конструктивных рамках продольной схемы (ХУ) УГИ 42.03 [4] в целях обеспечения прохождения вертикальных участков стволов, работоспособен для очень неглубоких и/или "очень вертикальных" участков скважин.

Единственная полноценная разработка ГИ по схеме Z, ИГН73-100/80 [20], реализована на базе гироскопа типа одноосного индикаторного гиросtabilизатора (ОИГС) и в целом успешно эксплуатируется четверть века [19]. В этом изделии благодаря нестандартному техническому решению удалось добиться приемлемой точности ГИ на базе типичного ЧЭ, применявшегося в характерных для технических решений прошлого века системах стабилизации – гироскопа Д7-ОЗИ с внутренним подвесом в виде сферического шарикоподшипника, обеспечивающего как главное вращение, так и две степени свободы подвеса ротора. Схема Z, реализованная на базе ОИГС, позволяет обойти важнейшее ограничение бесплатформенной схемы – большой диапазон измерения угловых скоростей.

Общее понимание принципа ее работы дает рис. 3. В качестве ЧЭ используется двухка-

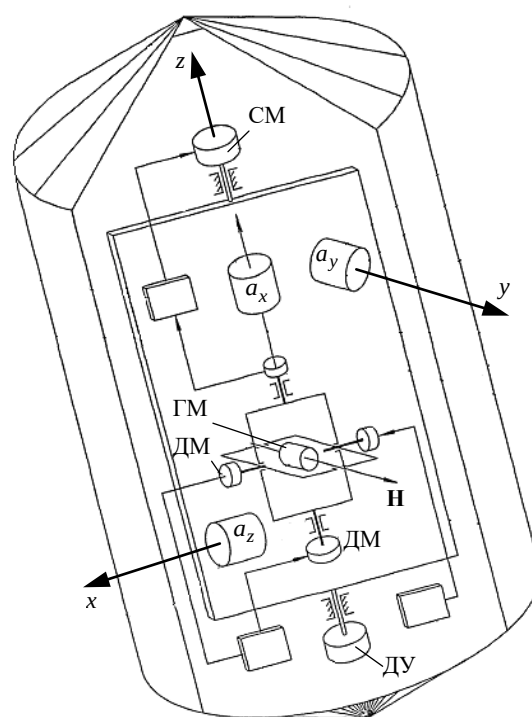


Рис. 3. Схема ОИГС: a_x , a_y , a_z – акселерометры; ГМ – гироскоп; СМ – стабилизирующий мотор; ДУ – датчик угла; ДМ – датчик момента гироскопа; $\mathbf{H}$ – вектор кинетического момента гироскопа

Fig. 3. Uniaxial indicator gyroscopic stabilizer scheme: a_x , a_y , a_z – accelerometers; ГМ – gyromotor; СМ – stabilizing motor; ДУ – angle sensor; ДМ – gyroscope torque sensor; $\mathbf{H}$ – gyroscope angular momentum vector

нальный управляемый гироскоп, по осям которого установлены датчики углов и датчики моментов, а также 3 акселерометра a_x , a_y , a_z . Вектор кинетического момента гироскопа $\mathbf{H}$ ориентирован в плоскости поперечного сечения ГИ. Один канал гироскопа используется в режиме ДУС для начальной азимутальной ориентации платформы, другой – является датчиком системы стабилизации, позволяющей удерживать платформу неподвижной относительно продольной оси СП, а матрица ориентации формируется по показаниям акселерометров.

При разработке упомянутого ГИ по схеме Z были предъявлены и обеспечены очень высокие требования к аппаратной точности стабилизации, обеспечившие допустимый уровень ухода ОИГС относительно оси z . Они были достигнуты во многом за счет схемы, подразумевавшей удержание вектора кинетического момента гироскопа около плоскости горизонта, а в целом – благодаря заимствованию конструк-

тивно-технических решений, традиционных для спецтехники второй половины XX в., весьма сложных, но освоенных за счет серийности, немислимой для рынка собственно ГИ.

К краткому описанию достоинств ИГН73 следует добавить, что сигнал угловой скорости, получаемый от второй измерительной оси трехстепенного гироскопа и не участвующий в формировании ОИГС, использовался в режиме ДУС для проведения точечного компасирования по принципу, аналогичному описанному в [1].

Подытоживая положительные характеристики, подтвержденные не одной сотней этих приборов за четверть века эксплуатации, еще раз подчеркнем, что они были обеспечены во многом уникальным сочетанием оригинального технического решения с конкретными производственно-экономическими условиями большого приборостроительного предприятия. ИГН73 не стал пилотным проектом широкого применения ОИГС для построения ГИ. Он с самого начала отставал от тенденций начинающегося XXI в. к уменьшению диаметра СП и переходу к бурению горизонтальных стволов. В настоящее время ГИ, выполненный по схеме Z с малым диаметром (42.0...44.5 мм), на рынке отсутствует, что отражает еще и общеиндустриальные тенденции: как правило, независимо от конкретного типа гироскопического датчика и количества (1 или 2) осей измерения угловой скорости, последние расположены в поперечном сечении ДУС. Другими словами, ДУС приспособлены в большинстве своем для осевого расположения в составе ГИ.

Достижение адаптивности к траектории для ГИ на единственном одноосном ДУС. Конструктивно-техническое решение, заключающееся в использовании одноосного КВГ вместо двухосного гироскопа (или двух одноосных) и стабилизации рамки в апсидальной плоскости скважины, предложенное в [1], также можно отнести к основанным на осевом расположении вектора кинетического момента ДУС (реального или воображаемого).

Предложенная в настоящей статье новация, схематично представленная на рис. 4, заключается в развороте установленного на подвижной рамке гироскопа на некоторый угол неортогональности χ и направлена на придание ГИ с одним ДУС (в [1] и во введении к настоящей ста-

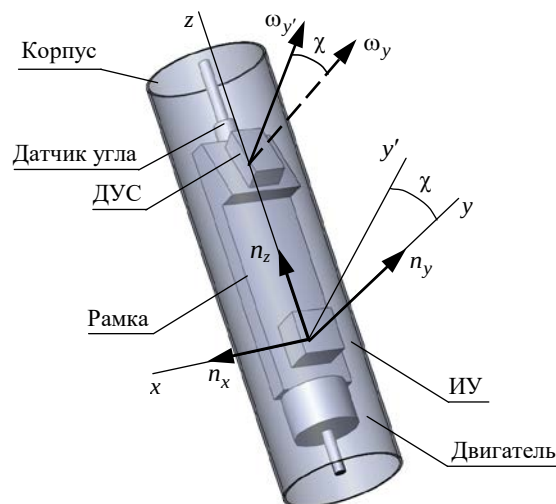


Рис. 4. ГИ с одноосным ДУС

Fig. 4. Gyroscopic inclinometer with a uniaxial angular rate sensor

тье обозначенным как модификация продольной схемы (ХУ)) некоторых качеств, свойственных Z-ОИГС. Поэтому в дальнейшем схема на рис. 4 названа неортогональной.

Для "разгрузки" ДУС при $\chi \neq 0$ от проекции угловой скорости, связанной с "моторным эффектом" кабеля, на котором подвешен СП (вращательным движением, обусловленным упругой деформацией кабеля и изменением его длины в процессе измерений), достаточно косвенной стабилизации подвижной рамки, т. е. ее удержания в положении $\psi \approx 0^\circ$. Стабилизация выполняется на основании информации от стороннего источника, в частности, от акселерометров [1]. При этом погрешность работы ГИ не зависит от строгости соблюдения условия $\psi \approx 0^\circ$, поскольку измеренное значение угла ψ учитывается в алгоритме определения азимута.

Таким образом, далее следует решить две задачи:

- конструктивную: оставаясь в рамках габаритных ограничений, развернуть корпус ДУС;
- расчетно-теоретическую: разработать алгоритм скважинной навигации, соответствующий новой кинематике системы.

Проекции абсолютной угловой скорости на оси x, y, z определяются так:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} \cos \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \sin \psi - \\ &- \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_y &= -\dot{\theta} \sin \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \cos \psi + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\sin A \sin \psi - \cos A \cos \theta \cos \psi); \\ \omega_z &= \dot{\psi} + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \cos \theta - \\ &- \Omega \cos \varphi \cos A \sin \theta.\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь и далее точка над обозначением переменной обозначает скорость ее изменения.

Имея в виду разворот измерительной оси гироскопа на угол χ вокруг оси x (рис. 5, а), можно записать:

$$\omega_{y'} = \omega_y \cos \chi + \omega_z \sin \chi. \quad (9)$$

Подставив соотношения из (8) в (9), имеем:

$$\begin{aligned}\omega_{y'} &= \\ &= \dot{\psi} \sin \chi - \dot{\theta} \sin \psi \cos \chi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \times \\ &\times (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \\ &+ \Omega \cos \varphi [\sin A \sin \psi \cos \chi + \\ &+ \cos A (\cos \theta \cos \psi \cos \chi - \sin \theta \sin \chi)].\end{aligned}\quad (10)$$

Принимая во внимание наличие косвенной стабилизации подвижной рамки около нуля и, вследствие этого, полагая ψ в (10) малым и меняя его обозначение на $\delta\psi$ (ошибку системы стабилизации), можно записать выражение

$$\begin{aligned}\dot{A} \sin(\theta + \chi) &= -\omega_y + \dot{\psi} \sin \chi - \delta\psi \dot{\theta} \cos \chi + \\ &+ \Omega \sin \varphi \sin(\theta + \chi) + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times [\delta\psi \sin A \cos \chi + \cos A \cos(\theta + \chi)].\end{aligned}\quad (11)$$

Ошибка системы стабилизации $\delta\psi$ – малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный "алгоритмической" (заведомым упрощением) или аппаратной "грубостью" системы стабилизации, известный с погрешностью ИУ [1].

Выражение (11) является аналитическим отражением придания ГИ с одним ДУС – модификации продольной схемы (ХУ) – некоторых качеств, свойственных Z-ОИГС. Благодаря изменению положения измерительной оси ДУС относительно корпуса СП он при любой ориентации ствола будет измерять ненулевую – с коэффициентом не менее, чем $\sin \chi$ ($\theta > 0$) – проекцию полезного сигнала $\dot{A}$. При значимых величинах угла ($\chi \geq 20^\circ$) множитель при $\dot{A}$, в отличие от исполнения, описанного в [1], при-

нимает значения от 1/3 до 1 при любых величинах угла θ , что обеспечивает желаемую адаптивность ГИ к траектории скважины в режиме непрерывных измерений.

Этот режим для описываемого построения ГИ подробно исследован далее.

Особую значимость имеет минимизация ошибки выработки азимута на вертикальных участках стволов для скважин типа S и L. Даже если предположить, что погрешность определения азимута ΔA в (4) имеет малое значение в точке с зенитным углом θ_0 , относящейся к близкому к вертикальному участку скважины типа S(L), и не возрастает по мере приближения к забою, она порождает рост бокового промаха α в соотношении $\sin \theta_{cp} / \sin \theta_0$. Он может достигнуть значения 15...30 и более, что подчеркивает особую значимость сохранения при движении в скважине точности начальной выставки ГИ в ее устье, где эта процедура проводится с особой тщательностью и, при необходимости, может обеспечиваться внешним источником курсоуказания, например спутниковым компасом (на двух разнесенных антеннах) или гиротеодолитом. Рассмотренная ситуация – наиболее важная побудительная причина повышенного внимания к азимутальной точности ГИ в вертикальной части ствола.

В связи с этим имеет смысл анализ модифицированной схемы с одним ДУС, развернутым на угол χ , начать с оценки точности компасирования.

Для схемы, описанной в [1], справедливы соотношения:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_x \cos(\varphi - \mu) + \omega_y \sin \nu \sin(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)]}; \\ \cos \Phi &= \frac{-\omega_x \sin \nu \sin(\varphi - \mu) + \omega_y \cos(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)]},\end{aligned}\quad (12)$$

где ω_x , ω_y – угловые скорости, вырабатываемые ДУС в двух отличающихся на 90° относительно продольной оси ГИ положениях рамки.

С учетом малости углов μ , ν выражения (12) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_x}{\Omega \cos \varphi} + \frac{(-\mu \omega_x + \nu \omega_y) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi}; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_y}{\Omega \cos \varphi} - \frac{(\nu \omega_x + \mu \omega_y) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi}.\end{aligned}\quad (13)$$

Для варианта ГИ с ДУС, развернутым на угол χ относительно плоскости поперечного сечения ГИ, выражения, аналогичные (12) и (13), будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_{x'} \cos(\varphi - \mu) + \omega_{y'} \sin \nu \sin(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} - \\ &\quad - \frac{\Omega \sin(\varphi - \mu) \sin \chi}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} \times \\ &\quad \times [\cos(\varphi - \mu) + \sin \nu \sin(\varphi - \mu)]; \\ \cos \Phi &= \frac{-\omega_{x'} \sin \nu \sin(\varphi - \mu) + \omega_{y'} \cos(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} - \\ &\quad - \frac{\Omega \sin(\varphi - \mu) \sin \chi}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} \times \\ &\quad \times [\cos(\varphi - \mu) + \sin \nu \sin(\varphi - \mu)]; \\ \sin \Phi &= \frac{\omega_{x'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \frac{(-\mu \omega_{x'} + \nu \omega_{y'}) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \\ &\quad + \frac{\mu \operatorname{tg} \chi}{\cos^2 \varphi} - \nu \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg}^2 \varphi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_{y'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - \frac{(\nu \omega_{x'} + \mu \omega_{y'}) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \\ &\quad + \frac{\mu \operatorname{tg} \chi}{\cos^2 \varphi} + \nu \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg}^2 \varphi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi,\end{aligned}\quad (14)$$

где $\omega_{x'}$, $\omega_{y'}$ – угловые скорости ДУС, измерительная ось которого развернута на угол χ , вырабатываемые в двух отличающихся на 90° относительно продольной оси ГИ положениях рамки.

В соотношениях (13) слагаемые в скобках определяются множителями μ , ν , что позволяет в выражениях для ω_x , ω_y в этой линейной комбинации (во всяком случае, для широт, представляющих реальный интерес при разведке и добыче полезных ископаемых) ограничиться учетом членов порядка угловой скорости вращения Земли. Заметим, что точный алгоритм идеальной работы ГИ по-прежнему описывается соотношениями (12), не имеющими методических погрешностей, связанных с отклонениями ствола от вертикали, однако с точки зрения простоты и наглядности сравнительного анализа ошибок, (13) и проводимое

далее упрощение оказываются очень удобными:

$$\sin \Phi = \frac{\omega_x}{\Omega \cos \varphi} - n_x \operatorname{tg} \varphi;$$

$$\cos \Phi = \frac{\omega_y}{\Omega \cos \varphi} - n_y \operatorname{tg} \varphi,$$

где n_x , n_y – выходные сигналы ИУ.

Рассуждая аналогично, упростим формулы (14):

$$\sin \Phi = \frac{\omega_{x'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - n_x \operatorname{tg} \varphi +$$

$$+ \mu \operatorname{tg} \chi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi;$$

$$\cos \Phi = \frac{\omega_{y'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - n_y \operatorname{tg} \varphi +$$

$$+ \mu \operatorname{tg} \chi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi.$$

Сравним дисперсии $D_\Phi = \sigma_\Phi^2$ для обеих схем, положив $\sigma_{\omega_x}^2 = \sigma_{\omega_y}^2 = \sigma_{\omega_{x'}}^2 = \sigma_{\omega_{y'}}^2 = \sigma_\omega^2$ и $\sigma_{n_x}^2 = \sigma_{n_y}^2 = \sigma_n^2$. Значения $D_{\Phi 1}$ и $D_{\Phi 2}$ для первой и второй схем соответственно будут определяться следующим образом:

$$D_{\Phi 1} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi} + \sigma_n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi; \quad (15)$$

$$D_{\Phi 2} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \chi} + \sigma_n^2 (\operatorname{tg}^2 \chi + \operatorname{tg}^2 \varphi).$$

Для ЧЭ, используемых (см. ранее) "в корректно спроектированных системах гироскопической навигации", справедливо соотношение $\sigma_\omega^2 / \Omega^2 \gg \sigma_n^2$. Тогда в (15) можно пренебречь вторыми слагаемыми, окончательно упростив их:

$$D_{\Phi 1} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi}; \quad D_{\Phi 2} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \chi},$$

и сделать окончательный вывод, что СКО двух схем различает коэффициент $\sec \chi = 1 / \cos \chi$. Это означает, что разворот оси чувствительности единственного ДУС, например, на угол $\chi = 20^\circ$ (конструктивно вполне реализуемый) от плоскости поперечного сечения ГИ приводит к увеличению на 6 % СКО его точечного компасирования вблизи вертикали. Таким образом, за-

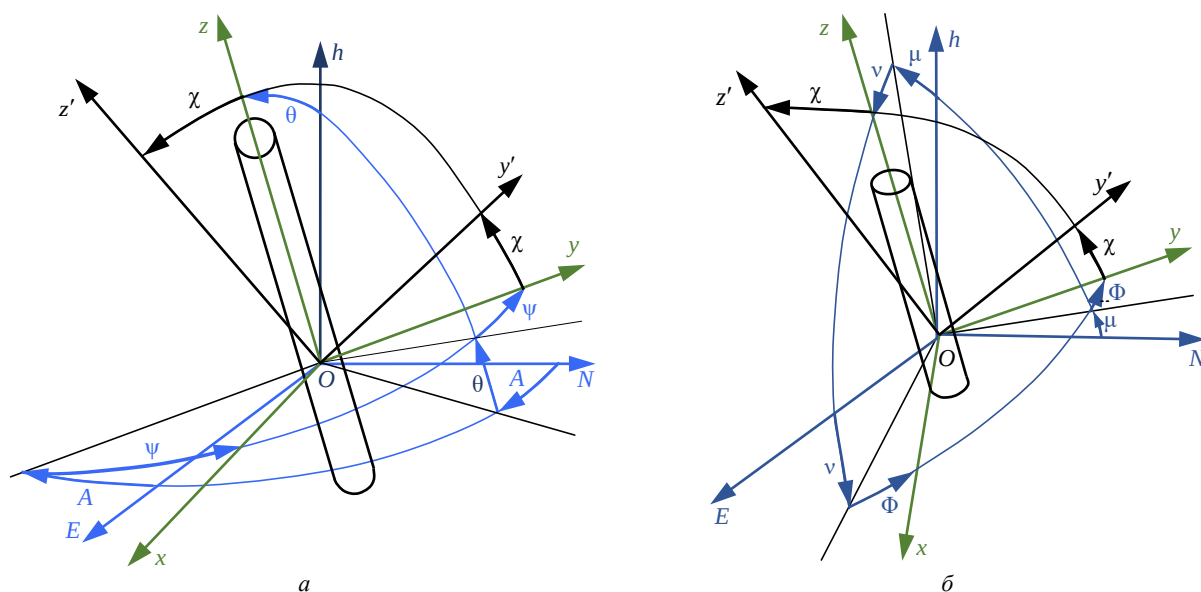


Рис. 5. Поворот на угол χ : а – в углах Эйлера; б – для съемки вертикальных скважин
Fig. 5. Rotation by angle χ : а – in Euler angles; б – for vertical borehole surveying

вершая этот анализ, можно констатировать, что проводимая авторами настоящей статьи конструктивная новация практически (глубоко в рамках допустимой неопределенности статистических характеристик) не влияет на сравнительную эффективность точечного режима ГИ.

Перейдем к анализу сравнительной эффективности использования предложенной схемы в непрерывном режиме. Для начальной фазы траектории ствола целесообразно воспользоваться углами ориентации μ , ν , Φ (рис. 5, б). Далее, проводя преобразования, аналогичные (8)–(10), запишем:

$$\begin{aligned} \omega_{y'} = & \sin \chi [\dot{\Phi} + \dot{\mu} \sin \nu + \Omega \sin(\varphi - \mu) \cos \nu] + \\ & + \cos \chi \{ [\dot{\nu} + \Omega \cos(\varphi - \mu)] \cos \Phi - \\ & - [\dot{\mu} \cos \nu - \Omega \sin \nu \sin(\varphi - \mu) \sin \Phi] \}. \end{aligned} \quad (16)$$

При дальнейшем анализе будем исходить из режима грубой (косвенной) стабилизации с точностью $\delta\Phi$ по углу Φ , определяемому с ошибкой $\Delta\Phi$. Здесь, как и ранее, $\delta\Phi$ – малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный неидеальностью системы стабилизации, известный с погрешностью ЧЭ ($\Delta\Phi$). Варьируя (16), учитывая заведомую малость углов μ , ν и пренебрегая, как и обычно для непрерывного режима, членами, определяемыми угловой скоростью вращения

Земли, получим следующее выражение для ошибки определения угловой скорости $\Delta\dot{\Phi}$:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\Phi} = & \frac{\Delta\omega_{y'}}{\sin \chi} - \Delta\dot{\mu}(\nu - \delta\Phi \operatorname{ctg} \chi) - \\ & - \Delta\nu \operatorname{ctg} \chi - \Delta\nu\dot{\mu} + \Delta\Phi \operatorname{ctg} \chi(\dot{\mu} + \dot{\nu}\delta\Phi). \end{aligned} \quad (17)$$

Схема ГИ с одноосным ДУС [1], бывшая объектом сравнительного анализа эффективности точечного компасирования для вертикальных скважин, в непрерывном режиме их съемки принципиально неработоспособна. В этом режиме для сравнения есть смысл использовать продольную схему с дополнительным микромеханическим гироскопом (ММГ) с измерительной осью, направленной вдоль оси z (так называемую схему XYZ , где малая буква z показывает низкую точность ММГ по сравнению с основным гироскопом), техническим и алгоритмическим решениям которой применительно к вертикальным стволам посвящены, в частности, работы [2, 4]. Алгоритм идеальной работы для этого варианта описан в [4] и, по существу, комплексирует ГИ типа XY и типа z (в котором азимут на вертикальном участке скважины определяется в соответствии с третьей формулой (8)) на базе общего ИУ. В начальной фазе траектории точность такого комплексного ГИ практически всецело будет определяться

погрешностями схемы z . Выражение, аналогичное (17), в данном случае будет иметь вид

$$\Delta\dot{\Phi} = \Delta\omega_z - (\Delta\dot{\mu}v + \Delta v\dot{\mu}). \quad (18)$$

С учетом (18) соотношение дрейфовых составляющих ошибок "продольной" схемы с дополнительным ММГ и с одним ДУС с неортогональной осью чувствительности на "вертикальных" стволах приближенно (с точностью до отказа от интегральных соотношений) определяется величиной $\Delta\omega_y' / (\Delta\omega_z \sin \chi)$. Для реально применяющихся ММГ она составляет не менее двух порядков, поэтому есть смысл продолжить сравнительный анализ применительно к иным погрешностям схемы.

Уже на первой секунде движения в скважине легко установить преобладающее влияние интеграла от первого (обусловленного дрейфом) слагаемого в правой части (18) по отношению к взятым в скобки второму и третьему членам, входящим и в правую часть (17). Для продолжения сравнительной оценки точности на вертикальном участке ствола продольной схемы с дополнительным ММГ (XYZ) и неортогональной схемы необходимо сопоставить (18) и (17). Следующим порогом, который преодолевает интеграл от $\Delta\omega_z$, является $\Delta v \operatorname{ctg} \chi$, значение которого определяется погрешностями ИУ. Для этого ММГ потенциально доступных моделей требуется 2...6 с.

Наибольшее влияние на неопределенность результатов сравнительного анализа оказывает начальное значение $\Delta\Phi_0$, порождающее в со-

ответствии с общим решением однородного линейного дифференциального уравнения, соответствующего (17), составляющую $\Delta\Phi_0 \exp[(\mu - \mu_0) \operatorname{ctg} \chi]$ (μ_0 – начальное значение μ), с учетом малости величины $(\mu - \mu_0)$ аппроксимируемую на начальном участке траектории как

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_0 [1 + (\mu - \mu_0) \operatorname{ctg} \chi]. \quad (19)$$

На рис. 6 сопоставляются значения $\Delta\Phi$, определяемые интегралом от $\Delta\omega_z$ (принято значение $\Delta\omega_z = 40^\circ/\text{ч}$) и полученные по (19), при разной интенсивности набора кривизны скважины в начальной фазе ее траектории. Из рис. 6, а и б, соответствующих диапазону естественного отклонения ствола от прямолинейности (т. е. погрешности выдерживания направления буровым инструментом без принятия специальных мер по его стабилизации), следует очевидное преимущество точности неортогональной схемы над XYZ. Если же в начальной фазе траектории уже планируется направленный набор кривизны (рис. 6, в) (ситуация не очень частая, но не исключительная), то обе схемы имеют сходные показатели точности. Следует отметить, что уровень неопределенности статистических характеристик дрейфа ММГ и погрешности начальной выставки ГИ позволяет рассматривать конкретное соотношение значений на рис. 6, в только в качестве примера.

В то же время существенные – показанные на рис. 6, в или близкие к ним – отклонения

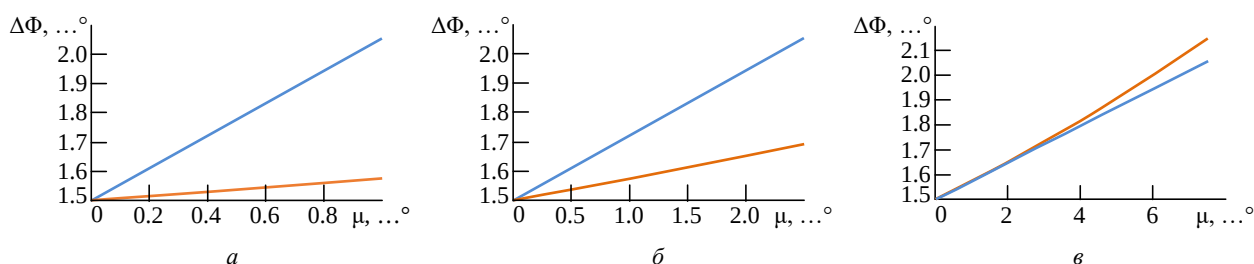


Рис. 6. Погрешность $\Delta\Phi$ в непрерывном режиме для двух схем при ошибке начальной выставки $\Delta\Phi_0$:

а – $\dot{\mu} = 0.02^\circ/\text{с}$; б – $\dot{\mu} = 0.05^\circ/\text{с}$; в – $\dot{\mu} = 0.15^\circ/\text{с}$;

— неортогональная схема ($\chi = 20^\circ$); — продольная схема с использованием ММГ

Fig 6. Error of the $\Delta\Phi$ in continuous mode for two circuits with an initial setting error $\Delta\Phi_0$:

а – $\dot{\mu} = 0.02^\circ/\text{с}$; б – $\dot{\mu} = 0.05^\circ/\text{с}$; в – $\dot{\mu} = 0.15^\circ/\text{с}$;

— non-orthogonal scheme ($\chi = 20^\circ$); — longitudinal diagram using a micromechanical gyroscope

стволов от вертикали позволяют вернуться к анализу в углах Эйлера и управлению рамкой по углу отклонителя (см. (11)), продолжив рассмотрение сравнительной эффективности неортогональной схемы для профиля скважины типа S на протяжении всей ее траектории.

Варьируем (11) для исходной схемы [1] с одним ДУС, т. е. при $\chi = 0$. Опуская, как указывалось ранее, члены, определяемые угловой скоростью вращения Земли, получим выражение

$$\Delta \dot{A} \sin \theta = -\Delta \omega_y - \Delta \dot{\theta} \delta \psi - \Delta \dot{A} \cos \theta, \quad (20)$$

по своему виду соответствующее теоретически и экспериментально подробно исследованным 10...15 лет назад соотношениям для ошибок продольной (ХУ) схемы [2, 4, 19]. Это вполне ожидаемо позволяет прибегнуть к известному выводу [1] о том, что, за исключением специальных профилей, почти не встречающихся по мере удаления стволов от вертикали, превалирующим в формировании ошибки азимута (см. (4)) и приводящим к ее накоплению, является член $\Delta \omega_y / \sin \theta$.

Для предложенной в настоящей статье модификации схемы с одним ДУС с неортогональной осью чувствительности аналогично имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{A} \sin(\theta + \chi) = & -\Delta \omega_y - \Delta \dot{\theta} \delta \psi \cos \chi + \\ & + \Delta \dot{\psi} \sin \chi - \Delta \dot{A} \cos(\theta + \chi). \end{aligned} \quad (21)$$

В отличие от (20), формула (21) получена впервые, но отличается от нее по структуре несущественно: коэффициент $\cos \chi$ близок к 1, а $\cos(\theta + \chi)$ для скважин типа S отличается от $\cos \theta$ не более, чем в 1.5...1.6 раза. Все это, как и появившийся в (21) аддитивный член $\Delta \dot{\psi} \sin \chi$, интегрирование которого тривиально, никак не меняет ожидаемого вывода: превалирующим для формирования в неортогональной схеме ошибки азимута и приводящим к ее накоплению является член $\Delta \omega_y / \sin(\theta + \chi)$.

Таким образом, поскольку основной вклад в погрешность определения азимута в обоих случаях вносит дрейф ДУС, можно сравнить уровень точности схем с помощью соотношения

$$F(\theta) = \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \chi)}. \quad (22)$$

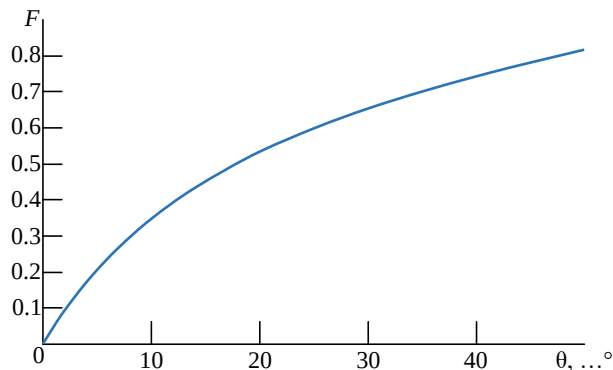


Рис. 7. Точность определения азимута в непрерывном режиме в схеме с $\chi = 20^\circ$ по отношению к схеме с $\chi = 0$ в диапазоне углов отклонителя, характерном для режима "грубой" стабилизации ($\cos \psi \approx 1$)

Fig. 7. Accuracy of azimuth determination in continuous mode in scheme with $\chi = 20^\circ$ relative to scheme with $\chi = 0$ in the range of deflector angles characteristic of a coarse stabilization mode ($\cos \psi \approx 1$)

На рис. 7 представлена зависимость $F(\theta)$, отражающая – в диапазоне зенитных углов, характерных для скважин типа S – эффективность (точнее, величину ей обратную) использования "неортогонального" ($\chi = 20^\circ$) расположения оси чувствительности единственного ДУС по отношению к использованной в качестве базы для сравнения [1] ($\chi = 0$). Уровень точности последней на рис. 7 принят за 1. Эффективность модифицированной схемы – как и ожидалось – особенно заметна для малых зенитных углов: при $\theta = 5^\circ$ точность возрастает в 5 раз, а для $\theta = 2^\circ$ – более, чем в 10 раз.

Заканчивая сравнительный анализ тактико-технических характеристик схем, базирующихся на использовании единственного ДУС, напомним о необходимом для их функционирования условии – грубой стабилизации ("разгрузке") рамки с инерциальными ЧЭ по "углу поворота отклонителя" ("азимуту отклонителя") для "вертикальных" скважин).

В качестве иллюстрации этого тезиса рассмотрим отличную от (22) зависимость

$$F_0(\psi, \theta) = \frac{\sin \theta}{\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi}, \quad (23)$$

характеризующую сравнительную эффективность стандартной (ХУ) продольной компоновки с двумя ДУС и исполнений ГИ с единственным ДУС, рассмотренных в [1] и в настоящей статье, при невозможности управления рамкой в целях грубой стабилизации. Семейство кри-

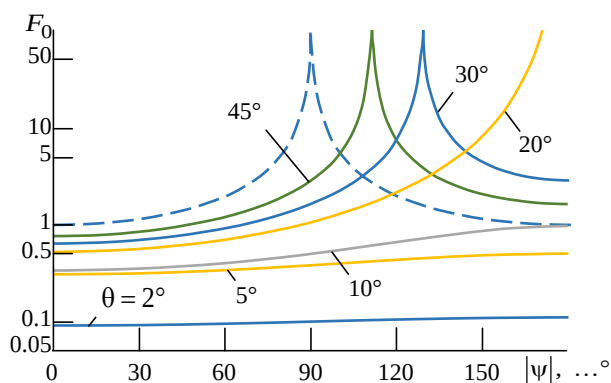


Рис. 8. Точность определения азимута в непрерывном режиме в полном диапазоне углов отклонителя (малые значения F_0 соответствуют большей точности): сплошные линии – неортогональная схема ($\chi = 20^\circ$); штриховая линия – схема при $\chi = 0^\circ$

Fig. 8. Accuracy of azimuth determination in continuous mode over the full range of deflector angles: solid lines – non-orthogonal scheme with $\chi = 20^\circ$; dashed line – scheme with $\chi = 0^\circ$ (small F_0 values correspond to a greater accuracy)

вых для углов $\theta = 2, 5, 10, 20, 30, 45^\circ$ при использовании неортогональной схемы (при $\chi = 20^\circ$) и единственная кривая при $\chi = 0^\circ$ (когда F_0 (23) не зависит от зенитного угла) представлены на рис. 8, который наглядно демонстрирует крайнюю ограниченность эффективности схем с единственным ДУС при невозможности осуществления разгрузки от движения СП (грубой стабилизации) в полном диапазоне угла поворота отклонителя.

Таким образом, схема, модифицированная за счет вывода измерительной оси ДУС из диаметральной плоскости ГИ, в непрерывном режиме сохранив возможность управления подвижной рамкой в целях грубой стабилизации по углу ψ , приобретает важнейшее свойство: влияние дрейфа ДУС на погрешность выработки азимута в зоне переходных – от вертикальных стволов к наклонно направленным – зенитных углов в разы падает, что позволяет сохранить в процессе движения в скважине уже упоминавшуюся повышенную точность начальной выставки ГИ в ее устье.

Заключение. Настоящая статья является продолжением работы [1], в которой были предложены принципы построения и проанализированы режимы работы ГИ, фактически воспроиз-

водящего хорошо известную продольную схему [2–4] с использованием только одного одноосного ДУС. Там же отмечалось, что при всей конструктивно-технической привлекательности этого варианта продольной схемы он воспроизводит и ее принципиальный изъян, характерный в тех или иных проявлениях для любой гироскопической системы с неполной информацией – отсутствие адаптивности к траектории скважины. В настоящей статье предложена минимальная модификация конструкции ГИ, рассмотренной в [1], позволяющая разрешить свойственную продольной (ХУ) схеме проблему съемки стволов, близких к вертикали, в непрерывном режиме. Для этого требуется обеспечить отклонение положения оси чувствительности ДУС на некоторый угол от ортогональности к продольной оси СП. Выбор значения угла неортогональности χ определяются, с одной стороны, конструктивными ограничениями на разворот ДУС выбранного типа при жестко заданных габаритах корпуса СП. Но, с другой стороны, независимо от этих сложностей угол χ не должен быть велик, поскольку эффективность начальной выставки, осуществляемой методом компасирования при вертикальном, как правило, положении СП, падает пропорционально $\cos \chi$. При проектировании ГИ на базе излагаемых идей конструктивно удалось реализовать значение $\chi = 20^\circ$, при котором увеличение погрешности компасирования не выходит за рамки неопределенности статистических характеристик дрейфа ДУС. Этого оказалось достаточно, чтобы реализовать устойчивый непрерывный режим такого ГИ в вертикальных стволах, невозможный в продольной схеме, и получить многократное преимущество перед ней в точности в зоне "переходных" зенитных углов для скважин типа S, "прилегающих к вертикали".

Задачами, ближайшими и завершающими цикл исследования адаптивного универсального ГИ, остается рассмотрение его работы в скважинах типа L, особенно вблизи плоскости горизонта, и сравнительный анализ его точности по отношению к "абсолютной" (трехосной) схеме.

Список литературы

1. Биндер Я. И., Хазов И. А. Универсальный гироскоп на базе единственного одноосного

датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 133–148. doi:

10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

2. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации / Я. И. Биндер, Т. В. Падерина, А. С. Лысенко, А. Н. Федорович // Гироскопия и навигация. 2010. № 4 (71). С. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020

3. Лысенко А. С. О применении гироинклинометра, построенного по продольной схеме в вертикальных скважинах // Материалы XXIX конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова, Санкт-Петербург, 07–09 окт. 2014 / ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2014. С. 137–149.

4. Лысенко А. С. Алгоритмы работы и схема построения гироинклинометра с продольной компоновкой для вертикальных участков стволов скважин // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 72–87. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.072-087

5. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с.

6. Самедов Т. А., Бинятов К. Т., Исмаилзаде К. Г. Исследование состояния работы наклонно направленных морских скважин // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее: сб. ст. XXI Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 05 мая 2019 г. Пенза: Наука и просвещение, 2019. С. 54–58.

7. Быков И. Ю., Борейко Д. А., Блохин П. А. Компьютерное моделирование экспериментальных стендов для исследования прочности захвата насосно-компрессорных труб элеваторов при капитальном ремонте вертикальных и наклонно направленных скважин // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 8 (589). С. 28–34. doi: 10.33285/2782-604X-2022-8(589)-28-34

8. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2016. Vol. 2, № 4. P. 365–395. doi: 10.1007/s40948-016-0038-y

9. Non-pumping reactive wells filled with mixing nano and micro zero-valent iron for nitrate removal from groundwater: Vertical, horizontal, and slanted wells / S. M. Hosseini, T. Tosco, B. Ataie-Ashtiani, C. T. Simmons // J. of Contaminant Hydrology. 2018. Vol. 210. P. 50–64. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.02.006

10. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in

Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic / Y-L. Chen, R. Azzam, T. M. Fernandez-Steeger, L. Li // Geotech. and Geol. Eng. 2009. Vol. 27, № 1. P. 155–167. doi: 10.1007/s10706-008-9220-5

11. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway // Proc. of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Eng. 2013. Vol. 166, iss. 3. P. 280–298. doi: 10.1680/geng.10.00099

12. Чагинов А. В., Суппес И. В., Дорн Э. А. Проходка и строительство стволов № 1 и 2 Усольского калийного комбината компании ОАО "ЕвроХим" // Горный журн. 2013. № 5. С. 51–56.

13. Accuracy Check and Comparative Analysis of Horizontal Fiber-Optic Gyro Inclinator in Freezing Hole / G. Jiang, F. Li, X. Zhou, W. Gao. // E3S Web Conf. 2020. Vol. 218. Art. № 03025. 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/202021803025

14. Малога А. Г. Инклинометры для исследования глубоких и сверхглубоких скважин / НТП "Фактор". Тверь, 2002. 519 с.

15. Биндер Я. И. Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра // Гироскопия и навигация. 2003. Т. 41, № 2. С. 38–46.

16. Гайбуллаев П. М. Добыча остаточных запасов углеводородов при помощи зарезки бокового ствола из бездействующего фонда скважин // Молодой ученый. 2022. № 47(442). С. 35–39.

17. Проектирование схем разбуривания месторождений горизонтальными и многоствольными скважинами / К. Н. Харламов, Г. Н. Шешукова, Т. В. Нестерова, И. Поздеев // Бурение и нефть. 2005. № 10. С. 18–20.

18. Абдуллин А. Ф., Баранников Я. И., Розбаев Д. А. Вовлечение в разработку остаточных запасов углеводородов методом зарезки бокового ствола из неработающего фонда скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. № 9 (357). С. 44–48. doi: 10.33285/2413-5011-2021-9(357)-44-48.

19. Непрерывные гироскопические инклинометры – особенности построения и результаты эксплуатации / А. А. Гуськов, В. В. Кожин, С. В. Кривошеев, Э. В. Фрейман // Каротажник. 2009. № 4 (181). С. 12–30.

20. Фрейман Э. В., Кривошеев С. В., Лосев В. В. Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиросtabilизатора // Гироскопия и навигация. 2001. № 1 (32). С. 36–46.

Информация об авторах

Биндер Яков Исаакович – кандидат технических наук (1988), главный конструктор АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", ведущий научный сотрудник кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета. **Адаптивный к траектории скважины универсальный гироинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости**
A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor

Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 110 научных работ. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Хазов Иван Анатольевич – научный сотрудник АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", аспирант 3-го года обучения кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области подземной навигации; обработка данных.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

References

1. Binder Ya. I., Khazov I. A. Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148 (In Russ.)
2. Binder Ya. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Fedorovich A. N. Various Schemes for Continuous GyroInclinometric Survey of Arbitrarily Oriented Wellbores. Gyroscopy and Navigation. 2010, no. 4 (71), pp. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020 (In Russ.)
3. Lysenko A. S. *O primeneni gironklinometra, postroennogo po prodol'noi skheme v vertikal'nykh skvazhinakh* [On the Use of a Gyroinclinometer Built According to a Longitudinal Scheme in Vertical Wells]. Proc. of the 29th Conf. dedicated to the memory of N. N. Ostyakov, Saint Petersburg, 7–9 Oct. 2014. Concern CSRI Elektropribor, 2014, pp. 137–149. (In Russ.)
4. Lysenko A. S. Algorithms and Design of Longitudinal Gyroinclinometer for Vertical Parts of Wellbores. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation]. 2016, no. 7, pp. 253–263. doi: 10.1134/S207510871603010X
5. Isachenko V. Kh. *Inklinometriya skvazhin* [Well Inclination]. Moscow, Nedra, 1987, 216 p. (In Russ.)
6. Samedov T. A., Binyatov K. T., Ismailzade K. G. *Issledovanie sostoyaniya raboty naklonno-napravlennykh morskikh skvazhin* [Study of the Operating Status of Directional Offshore Wells]. Proc. of the 21st Intern. Scientific and Practical Conf. "Science and Education: Preserving the Past, Creating the Future". Penza, 05 May 2019. Science and Education, 2019, pp. 54–58. (In Russ.)
7. Bykov I. U., Boreiko D. A., Blokhin P. A. Computer Simulation of Experimental Benches to Study the Strength of Elevator Tubing Gripping During Workover of Vertical and Directional Wells. Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex. 2022, no. 8 (589), pp. 28–34. doi: 10.33285/2782-604X-2022-8(589)-28-34 (In Russ.)
8. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on Vertical and Directional Drilling Technologies for the Exploration and Exploitation of Deep Petroleum Resources. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2016, vol. 2, no. 4, pp. 365–395. doi: 10.1007/s40948-016-0038-y
9. Hosseini S. M., Tosco T., Ataie-Ashtiani B., Simmons C. T. Non-Pumping Reactive Wells Filled with Mixing Nano and Micro Zero-Valent Iron for Nitrate Removal from Groundwater: Vertical, Horizontal, And Slanted Wells. J. of Contaminant Hydrology. 2018, vol. 210, pp. 50–64. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.02.006
10. Chen Y. L., Azzam R., Fernandez-Steege T. M., Li L. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic. Geotech Geol Eng. 2009, vol. 27, iss. 1, pp. 155–167. doi: 10.1007/s10706-008-9220-5
11. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of Ground Freezing Data from the Naples Subway. Proc. of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Eng. 2013, vol. 166, no. 3, pp. 280–298. doi: 10.1680/geng.10.00099
12. Chaginov A. V., Suppes I. V., Dorn E. A. Drilling and Construction of Shafts no. 1 and 2 of the Usolsky Potash Plant of the Company OJSC "EuroChem". *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2013, no. 5, pp. 51–56. (In Russ.)
13. Jiang G., Li F., Zhou X., Gao W. Accuracy Check and Comparative Analysis of Horizontal Fiber-Optic Gyro Inclination in Freezing Hole. E3S Web Conf. 2020, vol. 218, art. no. 03025, 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/202021803025
14. Malyuga A. G. *Inklinometriya dlya issledovaniya glubokikh i sverkhglubokikh skvazhin* [Inclinometers for Studying Deep and Ultra-Deep Wells]. Tver', NTP "Faktor", 2002, 519 p. (In Russ.)
15. Binder Ya. I. Analytical Compassing in Slim Hole Inclination. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 2 (41), pp. 38–46. (In Russ.)
16. Gaibullaev P. M. Extraction of Residual Hydro-

Carbon Reserves by Sidetracking from Idle Wells. *Молодой ученый* [Young Scientist]. 2022, no. 47 (442), pp. 35–39. (In Russ.)

17. Kharlamov K., Sheshukova G., Nesterova T., Pozdeev I. Design of Field Drilling Schemes with Horizontal and Multilateral Wells. *Бурение и нефть* [Drilling and Oil]. 2005, no. 10, pp. 18–20. (In Russ.)

18. Abdullin A. F., Barannikov Ya. I., Rozbaev D. A. Involvement in the Development of Residual Hydro-Carbon Reserves by Sidetracking from Idle Well Stock. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas*

Fields. 2021, no. 9 (357), pp. 44–48. doi: 10.33285/2413-5011-2021-9(357)-44-48

19. Gus'kov A. A., Kozhin V. V., Krivosheev S. V., Freiman E. V. Continuous Gyroscopic Inclometers - Design Features and Operating Results. *NTV "Karotazhnik"*. 2009, no. 4 (181), pp. 12–30. (In Russ.)

20. Freiman E. V., Krivosheev S. V., Losev V. V. Features of Algorithms Creating for Orientation of Gyroscopic Inclometers Based on a Uniaxial Gyrostabilizer. *Гироскопия и навигация* [Gyroscopy and Navigation]. 2001, no. 1 (32), pp. 36–46. (In Russ.)

Information about the authors

Yakov I. Binder, Cand. Sci. (1988), Chief designer of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation, leading researcher of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 110 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of marine and underground navigation.

Address: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Ivan A. Khazov, researcher of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of underground navigation; data processing.

Address: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

Сглаживание поверхностей 3D-моделей протезно-ортопедических изделий

А. Р. Суфэльфа^{1,2✉}, А. С. Вознесенский², Д. И. Каплун²

¹ ФГБУ ФНОЦ МСЭ и Р им. Г. А. Альбрехта Минтруда России, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ arsufelfa@stud.etu.ru

Аннотация

Введение. Формирование контактной поверхности в протезировании и ортезировании имеет решающее значение для восстановления опорно-двигательных функций человека. Рассмотрены особенности методов снижения уровня шума поверхности трехмерной модели, полученной после оптического сканирования, разработан алгоритм изготовления индивидуального протезно-ортопедического изделия.

Цель работы. Исследование и разработка методов цифровой фильтрации 3D-поверхностей, полученных после оптического сканирования, для дальнейшего моделирования индивидуальных модулей протезно-ортопедических изделий.

Материалы и методы. Предлагается усовершенствовать этап предварительной обработки трехмерной модели с помощью методов сглаживания и шумоподавления. Для тестирования были отобраны 50 оптических 3D-сканов и выбраны алгоритмы устранения шума: билатеральная фильтрация, анизотропное сглаживание, средняя и медианная фильтрация.

Результаты. Исследование проводилось на 3D-сканах усеченных нижних конечностей и заготовок для изготовления ортезов – корсетов Шено, полученных от Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНОЦ МСЭ и Р им. Г. А. Альбрехта Минтруда России. Предложен метод очищения от шумов и сглаживания поверхностей 3D-моделей для изготовления протезно-ортопедических изделий. Описание применения подобных методов в литературе найти не удалось, возможно, потому, что для изготовления протезов и ортезов чаще всего используется гипсовая технология. Было рассчитано отношение сигнал/шум по метрике SNR – δ -SNR с усреднением по сканированиям и значениям SNR и среднее время фильтрации. Результаты исследования показывают, что лучшим является метод билатеральной фильтрации с δ -SNR = 11.3362 дБ и временем выполнения 8.8900 с.

Заключение. Применение вышеуказанных методов для предварительной обработки трехмерных оптических сканов человека обеспечило высокие результаты при формировании 3D-моделей модулей протезно-ортопедических изделий. Исследование представляет интерес для работы в направлении автоматизации процессов изготовления протезно-ортопедических изделий, особенно ввиду вызовов современной геополитической обстановки.

Ключевые слова: протезно-ортопедическое изделие, билатеральная фильтрация, анизотропное сглаживание, средняя и медианная фильтрация, 3D-скан

Для цитирования: Суфэльфа А. Р., Вознесенский А. С., Каплун Д. И. Сглаживание поверхностей 3D-моделей протезно-ортопедических изделий // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 108–117. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-108-117

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 22-19-00573).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Институту протезирования и ортопедии ФГБУ ФНОЦ МСЭ и Р им. Г. А. Альбрехта Минтруда России за сотрудничество и помощь.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; принята к публикации после рецензирования 28.06.2024; опубликована онлайн 29.11.2024

Mesh Smoothing of 3D Prosthesis and Orthosis Models

Alisa R. Sufelfa^{1,2✉}, Alexander S. Voznesensky², Dmitry I. Kaplun²

¹ Albrecht Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation, St Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ arsufelfa@stud.etu.ru

Abstract

Introduction. Formation of a contact surface in prosthetics and orthotics is crucial for the restoration of human musculoskeletal functions. This paper considers specific features of methods currently used for denoising of a 3D model surface obtained by optical scanning. An algorithm for manufacturing an individual prosthetic and orthopedic product is developed. The current literature reports no similar methods, which may be explained by the widespread use of gypsum technology for the manufacture of prostheses and orthoses.

Aim. Research and development of digital filtration methods for 3D meshes obtained by optical scanning for further modeling of individual prosthesis and orthosis modules.

Materials and methods. It is proposed to optimize the pre-processing stage of 3D scanned models by applying denoising and smoothing processes. In total, 50 optical 3D scans were selected for testing via the following denoising algorithms: bilateral filtering, vertex-based anisotropic smoothing, mean and median filtering applied to face normals.

Results. The study was conducted using 3D scans of lower limb stumps and Chenault brace orthoses and corsets provided by the Institute of Prosthetics and Orthotics, Albrecht Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation. A method for denoising and smoothing of the 3D model surfaces for the manufacture of prosthetic and orthopedic products is proposed. The SNR metric difference $SNR - \delta-SNR$ (with averaging by scans and SNR values) and average execution time were calculated. The bilateral filtration method with $\delta-SNR = 11.3362$ dB and a runtime of 8.8900 s showed the highest efficiency.

Conclusion. The proposed methods for the pre-processing stage of 3D optical scans showed high efficiency in the formation of 3D models of prosthesis and orthosis modules. The results obtained can be used for automating the process of manufacturing various prosthetic and orthopedic products, which is particularly relevant in the context of the modern geopolitical situation.

Keywords: prosthetics and orthotics, bilateral filtering, vertex-based anisotropic smoothing, mean and median filtering, 3D scan

For citation: Sufelfa A. R., Voznesensky A. S., Kaplun D. I. Mesh Smoothing of 3D Prosthesis and Orthosis Models. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 108–117. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-108-117

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

Source of funding. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant RSF 22-19-00573).

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific and Educational Center of Medical and Social Expertise and Rehabilitation n. a. G. A. Albrecht" of the Ministry of Labour and Social protection of the Russian Federation, to the Institute of Prosthetics and Orthotics for cooperation and assistance.

Submitted 22.04.2024; accepted 28.06.2024; published online 29.11.2024

Введение. Автоматизация процесса формирования индивидуального модуля протеза конечности позволяет усовершенствовать технологии производства индивидуальных протезно-

ортопедических модулей. Конечный результат протезирования во многом зависит от качества изготовления приемной гильзы.

Проблема полного прилегания индивидуального модуля протезно-ортопедического изделия важна при изготовлении современных индивидуальных модулей протезно-ортопедических изделий, в частности для корректирующих корсетов (типа Шено). В мировой практике корсетирование уже более 30 лет является основным научно обоснованным методом консервативного лечения промежуточных форм (II–III ст.) сколиоза у детей и подростков [1]. Формирование уникальной индивидуальной контактирующей поверхности протезов и ортезов с телом человека – один из ключевых этапов в процессе протезирования и ортопедической коррекции. Поэтому при протезировании важно точно соблюдать параметры, специфичные для каждого пациента. В настоящее время специалисты по протезированию формируют индивидуальные протезно-ортопедические изделия в цифровой среде вручную с помощью специализированного программного обеспечения. Предобработка заготовок для данных изделий занимает треть от общего времени формирования индивидуального изделия. Однако для выполнения операций предобработки не требуются компетенции специалиста по протезированию, поэтому данный этап может быть автоматизирован.

Общий конвейер технологического процесса формирования цифровой модели протезно-ортопедического изделия, изготавливаемого аддитивным способом, состоит из четырех этапов. На первом этапе происходит снятие индивидуальной формы – оптическое сканирование пациента. На втором этапе необходимо удалить артефакты из цифровой модели, полученной после оптического сканирования, выделить по-

лезную форму и ориентировать ее относительно вертикальной оси декартовых координат. Третий этап – моделирование технического средства реабилитации (протеза или ортеза), четвертый – изготовление индивидуального модуля протеза с использованием 3D-принтера или станка с числовым программным управлением.

Наиболее важные моменты в этом процессе – сканирование культи и обработка цифровой модели усеченной конечности. В то же время для автоматизации наиболее перспективен второй этап, который в настоящее время выполняется вручную с помощью специализированного программного обеспечения [2–4]. При ручном очищении от артефактов цифровой поверхности модели культи, полученной после оптического сканирования, специалист тратит от 40 до 60 мин на удаление артефактов с модели. В то же время, в случае автоматической предварительной обработки модели этап фильтрации 3D-поверхности необходим, поскольку без него невозможна дальнейшая автоматическая предварительная обработка цифровой поверхности.

Цель – исследование и разработка методов цифровой фильтрации 3D-поверхностей, полученных после оптического сканирования, для дальнейшего моделирования индивидуальных модулей протезно-ортопедических изделий.

Материалы и методы. В качестве методов исследования применены: билатеральная фильтрация, анизотропное сглаживание, средняя и медианная фильтрация. Для тестирования были отобраны 50 оптических 3D-сканов Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНОЦ МСЭ и Р им. Г. А. Альбрехта Минтруда России, полученных со сканера iSense (3D Systems, США). Характеристики сканера приведены в таблице [5]. Форматы исходных 3D-сканов: OBJ, PLY, STL.

Моделирование проводилось на ПК со сле-

Характеристики 3D-сканера

3D scan characteristics 3D Systems iSense

Характеристика	Значение	Ед. измерения
Точность	1	мм
Скорость сканирования	30	кадр/с
Максимальное разрешение сканирования	640 × 480	пикселей
Максимальное расстояние до объекта	3.5	м
Минимальное расстояние до объекта	0.4	м
Максимальный объем сканирования в автоматическом режиме	3000 × 3000	мм
Максимальный объем сканирования в "ручном" режиме	3000 × 3000 × 3000	мм
Минимальный объем сканируемого объекта	200 × 200 × 200	мм

дующей архитектурой: ОС Win 11 64-бит, ЦП Intel Core i7-12700KF 3.6-5.0 (boost) ГГц (ядра: 8P + 4E, количество потоков: 20), ОЗУ DDR5 Kingston FURY Beast Black RGB 6,0 ГГц, 32 Гбайт, GPU NVIDIA GeForce RTX 3080 GDDR6X 10 Гбайт, ядро CUDA 8704 в ПО MATLAB R2022b 64-бит. Визуализация и анализ выполнены с использованием Meshlab 2022.02 [6].

Результаты. Для полученных оптических 3D-сканов было рассчитано соотношение сигнал/шум по метрике SNR (Signal-to-Noise Ratio) с усреднением по сканированиям и значениям SNR, а также среднее время фильтрации.

Шумоподавление поверхностей 3D-моделей заключается в удалении случайно отсканированных артефактов из файла трехмерной модели (дублирование полигонов), восстановлении разрывов поверхности модели, искажений в области замыкания поверхности (шва) и устранении ее шероховатости. Основными внешними факторами, влияющими на качество съемки при использовании бесконтактных ручных 3D-сканеров, являются освещенность, текстура поверхностей деталей объектов, форма объектов, их подвижность, соответствие техническим требованиям к 3D-сканеру: скорость перемещения; фокусное расстояние. Даже при соблюдении требований к условиям съемки во время 3D-сканирования сегментов человеческого тела могут возникать поверхностные искажения электронной геометрической модели [7–9].

Анализируя существующее программное обеспечение для 3D-моделирования, которое можно использовать при формировании цифровых моделей протезно-ортопедических изделий для их дальнейшего изготовления, можно назвать: "ScanIP", компании "Simpleware" (Великобритания); "Magics", компании "Materialize" (Бельгия) либо "InVesalius", компании "STI" (Бразилия). Для программного моделирования известны специализированные CAD-системы: Bioshape (США); rodin4D NEO (Франция); PandoFit (Болгария); Canfit (Канада); Standard Cyborg Design Studio (США).

Такое программное обеспечение предоставляет инструменты для изменения объема и размерных параметров заготовок (3D-скана усеченной конечности или торса человека), моделирования изделий и позволяет повысить повторяемость изделий за счет анализа предыду-

щего опыта и создания библиотеки моделируемых элементов изделия. В России подобные системы уже используются при изготовлении функционально-корректирующих корсетов. Однако представленные программы не могут предложить оператору цифровую модель, обработанную после оптического сканирования, и ему приходится выполнять обработку вручную, включая сглаживание и шумоподавление полученной цифровой модели.

Алгоритмы сглаживания и шумоподавления используются преимущественно для фильтрации шумов на 2D-изображениях, в описываемой работе рассматривается применение методов фильтрации для сглаживания и шумоподавления 3D-поверхности.

Триангулированная сетка в трехмерном пространстве. Задача уменьшения шумов и сглаживания сетки обусловлена, в частности, методом получения трехмерной поверхности – трехмерным оптическим сканированием. В данном случае для формирования контактной поверхности протеза или ортеза был использован метод ручного трехмерного оптического сканирования сканером iSense (3D Systems, США) [10].

В компьютерной графике и системах автоматизированного проектирования, как и после оптического сканирования, 3D-объекты обычно представляются в виде многоугольных или треугольных сеток [11, 12].

Пусть $M = (V, E, T)$ – треугольная сетка, где $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ – множество вершин; $E = \{e_{ij}\}$ – множество ребер; $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ – набор треугольников. Каждое ребро $e_{ij} = [v_i, v_j]$ соединяет пару вершин $\{v_i, v_j\}$. Две различные вершины $v_i, v_j \in V$ являются смежными, если они соединены ребром, т. е. $e_{ij} \in E$.

Окрестностью (также называемой кольцом) вершины v_i является множество $v_i^* = \{v_j \in V : v_i \sim v_j\}$. Степень d_i вершины v_i – это просто мощность v_i^* . Обозначим через $T(v_i^*)$ множество треугольников кольца v_i^* , а через t_i^* – множество всех треугольников,

имеющих общую вершину или ребро с треугольником $\mathbf{t}_i \in T$ сетки $M = (V, E, T)$.

Топология триангуляции определяется наборами: вершинами $V = \{1, \dots, n\}$, ребрами $E \subset V \times V$ и гранями $F \subset V \times V \times V$ – n вершин и m граней. Набор граней F хранится в матрице $F \in \{1, \dots, n\}^{3 \times m}$. Позиции $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3$ для $i \in V$ из n вершин хранятся в матрице $X_0 = (\mathbf{x}_{0,i})_{i=1}^n \in \mathbb{R}^{3 \times n}$.

Модель шума. Искусственно зашумленная 3D-поверхность формируется случайным смещением вдоль направления нормали, используя аддитивный белый гауссовский шум. Параметр $\rho > 0$ управляет количеством шума. Нормали к сетке $N = (\mathbf{N}_i)_{i=1}^n$ рассчитываются усреднением нормалей к граням, прилегающим к каждой вершине. Смещая вершины вдоль нормального направления создаем зашумленную сетку:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{0,i} + \rho \varepsilon_i \mathbf{N}_i \in \mathbb{R}^3,$$

где $\varepsilon_i \sim N(0, 1)$ – реализация гауссовской случайной величины; $\mathbf{N}_i \in \mathbb{R}^3$ – нормаль к поверхности для каждой вершины с индексом i .

SNR (в децибелах) вычисляется как

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sigma_{\text{signal}}^2}{\sigma_{\text{noise}}^2} = 10 \lg \frac{\|X\|}{\|X - Y\|},$$

где X – исходный чистый сигнал (эталонный); Y – сигнал без шума.

Билатеральная фильтрация. Билатеральный фильтр – нелинейный сглаживающий фильтр для изображений, сохраняющий границы и уменьшающий шум. Он заменяет интенсивность каждого пикселя средневзвешенным значением интенсивности соседних пикселей, основанным на гауссовском распределении. Важно отметить, что весовые коэффициенты зависят не только от евклидова расстояния между пикселями, но и от радиометрических различий (например, различий в дальности, таких, как интенсивность цвета, расстояние по глубине и т. д.), что позволяет сохранить четкие границы для 3D-модели после фильтрации [13].

Итеративный процесс вычисления новой нормали с использованием билатеральной фильтрации выглядит следующим образом:

$$\mathbf{n}_i^k = \Lambda \left\{ \sum_{\mathbf{f}_j \in N_i} A_j W_s(\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\|) W_r(\|\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_j\|) \mathbf{n}_j \right\},$$

где Λ – нормализующий оператор; N_i – множество соседних граней для грани $\mathbf{f}_i$; A_j – площадь грани $\mathbf{f}_j$; $W(x) = \exp(-x^2/(2\sigma^2))$ – гауссиан; $\mathbf{c}_j$ – центр тяжести грани $\mathbf{f}_j$ (точка пересечения медиан треугольника); $\mathbf{n}_j$ – нормаль к грани $\mathbf{f}_j$.

Билатеральный фильтр представляет собой средневзвешенное значение с весом, состоящим из нескольких частей. $W_s(x)$ определяет для грани $\mathbf{f}_i$ значимость грани $\mathbf{f}_j$ с точки зрения расстояния друг от друга – чем больше расстояние, тем меньше вес. Аналогично – $W_r(x)$, только на вес влияет не расстояние между гранями, а разница между векторами нормалей к грани. Также учитывается значение площади грани A_j .

Алгоритм устранения шума билатеральной фильтрации требует от пользователя интерактивного задания двух параметров σ_s и σ_r . Однако отсутствие информации об объекте может повлиять на результат сглаживания поверхности.

Анизотропное сглаживание на основе вершин. Метод анизотропного сглаживания на основе вершин основан на высокой эффективности анизотропной диффузии при устранении шума с изображений [14] и определяется следующим уравнением:

$$\mathbf{v}_t = \text{div} \left(g(|\nabla \mathbf{v}|) \nabla \mathbf{v} \right),$$

где g – весовая функция Коши (также известная как функция Лоренца), задаваемая формулой

$$g(x) = \frac{1}{1 + x^2/c^2}.$$

Здесь c – постоянный настраиваемый параметр.

В дискретной форме анизотропная диффузия на основе вершин определяется следующим правилом обновления:

$$\mathbf{v}_i \leftarrow \mathbf{v}_i + \sum_{\mathbf{v}_j \in \mathbf{v}_i^*} \frac{1}{\sqrt{d_i}} \left(\frac{\mathbf{v}_j}{\sqrt{d_j}} - \frac{\mathbf{v}_i}{\sqrt{d_i}} \right) \times \\ \times \left(g(|\nabla \mathbf{v}_i|) + g(|\nabla \mathbf{v}_j|) \right),$$

где $|\nabla \mathbf{v}_i| = \sqrt{\sum_{\mathbf{v}_j \in \mathbf{v}_i^*} \left\| \frac{\mathbf{v}_i}{\sqrt{d_i}} - \frac{\mathbf{v}_j}{\sqrt{d_j}} \right\|^2}$; $|\nabla \mathbf{v}_j| =$
 $= \sqrt{\sum_{\mathbf{v}_k \in \mathbf{v}_j^*} \left\| \frac{\mathbf{v}_j}{\sqrt{d_j}} - \frac{\mathbf{v}_k}{\sqrt{d_k}} \right\|^2}.$

Среднее и медиана, применяемая к нормальям граней. Фильтрация с использованием среднего значения осуществляется в 3 последовательных этапа [15]:

Шаг 1. Вычисление средневзвешенной по площади нормали к поверхности $\mathbf{m}(\mathbf{t}_i)$ для каждого треугольника сетки $\mathbf{t}_i$:

$$\mathbf{m}(\mathbf{t}_i) = \frac{1}{\sum_{\mathbf{t}_j \in \mathbf{t}_i^*} A(\mathbf{t}_j)} \sum_{\mathbf{t}_j \in \mathbf{t}_i^*} A(\mathbf{t}_j) \mathbf{n}(\mathbf{t}_j).$$

Шаг 2. Нормализация усредненной нормали $\mathbf{m}(\mathbf{t}_i)$:

$$\mathbf{m}(\mathbf{t}_i) \leftarrow \frac{1}{\|\mathbf{m}(\mathbf{t}_i)\|}.$$

Шаг 3. Обновление каждой вершины $\mathbf{v}_i$ в сетке следующим образом:

$$\mathbf{v}_i \leftarrow \mathbf{v}_i + \frac{1}{\sum_{\mathbf{t}_j \in T(\mathbf{v}_i^*)} A(\mathbf{t}_j)} \sum_{\mathbf{t}_j \in T(\mathbf{v}_i^*)} A(\mathbf{t}_j) \pi_i(\mathbf{t}_j),$$

где $\pi_i(\mathbf{t}_j) = \langle \mathbf{e}_{ij}, \mathbf{m}(\mathbf{t}_j) \rangle \mathbf{m}(\mathbf{t}_j)$; $\mathbf{e}_{ij} = \mathbf{c}_j - \mathbf{v}_i$ – вектор, идущий от вершины $\mathbf{v}_i$ к центру $\mathbf{c}_j$ треугольника $\mathbf{t}_j$. Отметим, что по определению скалярного произведения вектор $\pi_i(\mathbf{t}_j)$ является проекцией вектора $\mathbf{e}_{ij}$ на направление нормали $\mathbf{t}_j$.

Вместо вычисления средней нормали к грани на шаге 1 метод угловой медианной фильтрации находит медианный угол θ_i из множества $\{\theta_{ij} = \angle(\mathbf{m}(\mathbf{t}_i), \mathbf{m}(\mathbf{t}_j)) : \mathbf{t}_j \in \mathbf{t}_i^*\}$ из всех соседних треугольников, чтобы заменить нормаль $\mathbf{m}(\mathbf{t}_i)$ центра треугольника на нормаль $\mathbf{m}(\mathbf{t}_j)$.

Набор данных представляет собой 50 трехмерных моделей после сканирования в формате OFF, искаженных аддитивным белым гауссовским шумом в диапазоне 0...40 дБ (с шагом 5 дБ). Для тестирования рассматривался аддитивный белый гауссовский шум, алгоритм с использованием псевдокода приведен ниже.

Псевдокод:

DenoisePoint (вершина $\mathbf{v}$, нормаль $\mathbf{n}$)

$\{\mathbf{q}_i\} = \text{neighborhood}(\mathbf{v})$

$K = |\{\mathbf{q}_i\}|$

sum = 0

normalizer = 0

for i := 1 to K

$t = \|\mathbf{v} - \mathbf{q}_i\|$

$h = \langle \mathbf{n}, \mathbf{v} - \mathbf{q}_i \rangle$

$w_c = \exp(-t^2/(2\sigma_c^2))$

$w_s = \exp(-h^2/(2\sigma_s^2))$

 sum += ($w_c \cdot w_s$) · h

 normalizer += $w_c \cdot w_s$

end

 return Vertex $\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{v} + \mathbf{n} \cdot (\text{sum}/\text{normalizer})$

В ходе работы были рассчитаны δ -SNR с усреднением по сканированиям и значениям SNR и среднее время выполнения (рисунок):

• Среднее значение δ -SNR (в децибелах)

для исследованных методов:

– билатеральная фильтрация – 11.3362;

– анизотропное сглаживание на основе вершин – 7.1672;

– среднее и медиана, применяемая к нормальям граней – 3.2043.

• Среднее время выполнения (в секундах)

для исследованных методов:

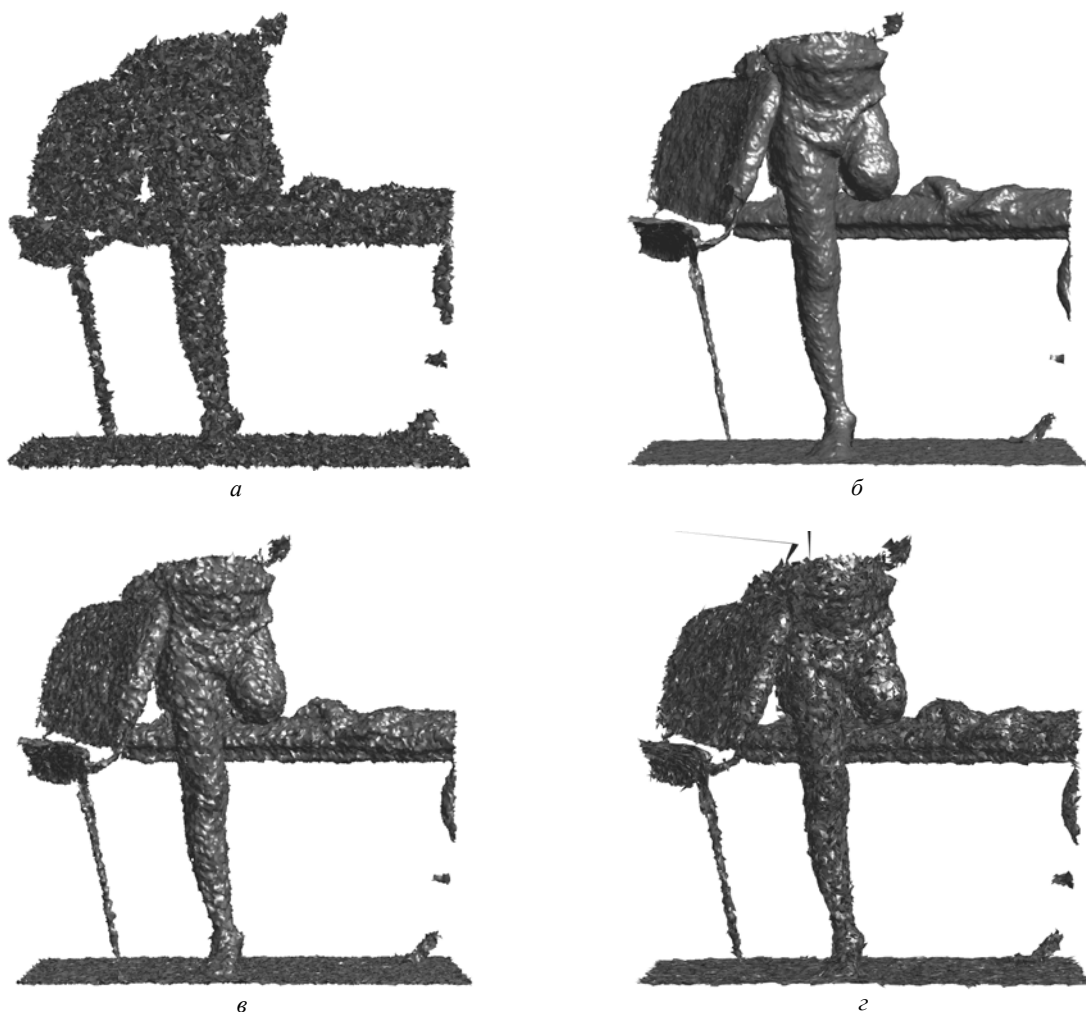
– билатеральная фильтрация – 8.8900;

– анизотропное сглаживание на основе вершин – 0.2435;

– среднее и медиана, применяемая к нормальям граней – 69.4711.

Метод устранения шума и сглаживания цифровой поверхности 3D-модели на основе билатеральной фильтрации ускоряет процесс предварительной обработки в части сглаживания поверхности 3D-модели в 6 раз по сравнению с ручной обработкой специалистом в специализированных программах.

Заключение. Применение исследованных методов для предварительной обработки загото-



Результаты устранения шумов и сглаживания поверхности 3D-модели: *а* – оригинал, SNR = 39.9897 дБ; *б* – билатеральная фильтрация, SNR = 49.8679 дБ; *в* – анизотропное сглаживание на основе вершин, SNR = 46.9479 дБ; *г* – фильтрация по среднему и медиане, применяемая к нормальям граней, SNR = 39.0308 дБ

Results of 3D model surface denoising and smoothing: *а* – original, SNR = 39.9897 dB; *б* – bilateral filtering, SNR = 49.8679 dB; *в* – anisotropic vertex-based smoothing, SNR = 46.9479 dB; *г* – mean and median filtering applied to face normals, SNR = 39.0308 dB

вок протезно-ортопедических изделий, в частности 3D-сканов усеченной конечности и торса человека, дало высокие результаты при формировании цифровых моделей индивидуальных модулей протезно-ортопедических изделий.

По результатам исследования лучшим оказался метод билатеральной фильтрации с δ -SNR = 11.3362 дБ и временем выполнения 8.8900 с. Эффективность разработанного алгоритма билатеральной фильтрации 3D-поверхностей моделей протезов и ортезов оценивалась по соотношению результата и ресурса (времени), так как результаты выполнения сглаживания вручную с помощью специализированного программного обеспечения и с использованием разработанного алгоритма мож-

но считать равными, а затрачиваемый ресурс при обработке вручную в 6 раз больше, что подтверждает высокую эффективность применения разработанного алгоритма.

Процесс производства протезно-ортопедических изделий, в частности индивидуальных модулей протезов конечностей и корсетов Шено, может быть оптимизирован благодаря автоматической обработке трехмерной модели цифровой поверхности. Предложенный способ может быть использован для сглаживания любых поверхностей после оптического трехмерного сканирования. Протезы и ортезы, изготовленные с использованием 3D-сканирования и 3D-печати, демонстрируют высокую эффективность в практическом применении в рамках экспериментального протезирования.

Список литературы

1. Adolescent idiopathic scoliosis: the effect of brace treatment on the incidence of surgery / C. J. Goldberg, D. P. Moore, E. E. Fogarty, F. E. Dowling // *Spine*. 2001. Vol. 26, № 1. P. 42–47. doi: 10.1097/00007632-200101010-00009
2. Condie E., Scott H., Treweek Sh. Lower limb prosthetic outcome measures: a review of the literature 1995 to 2005 // *J. of Prosthetics and Orthotics*. 2006. Vol. 18, iss. 6. P. 13–45. doi: 10.1097/00008526-200601001-00004
3. World Health Organization. Guidelines for training personnel in developing countries for prosthetics and orthotics services. URL: https://www.afro.who.int/sites/default/files/2017-06/who_guidelines_training_personnel_en.pdf (дата обращения 11.10.2024)
4. A scoping literature review of the provision of orthoses and prostheses in resource-limited environments 2000–2010. Part two: research and outcomes / A. J. Ikeda, A. M. Grabowski, A. Lindsley, E. Sadeghi-Demneh, K. D. Reisinger // *Prosthetics and orthotics international*. 2014. Vol. 38, iss. 5. P. 343–362. doi: 10.1177/0309364613490443
5. 3DToday 3D Systems iSence. URL: <https://3dtoday.ru/3d-scanners/3d-systems/isense> (дата обращения 11.10.2024)
6. MeshLab 2022.02 release notes. Official GitHub repository. URL: <https://github.com/cnr-isti-vclab/meshlab> (дата обращения 02.08.2023)
7. Advanced trans-tibial socket fab-rication using selective laser sintering / B. Rogers, G. W. Bosker, R. H. Crawford, M. C. Faustini, R. R. Neptune, G. Walden, A. J. Gitter // *Prosthetics and orthotics international*. 2007. Vol. 31, № 1. P. 88–100. doi: 10.1080/03093640600983923
8. Effects of lower limb prosthesis on activity, participation, and quality of life: a systematic review / K. A. M. Samuelsson, O. Töytäri, A.-L. Salminen, Å. Brandt // *Prosthetics and Orthotics International*. 2012. Vol. 36, iss. 2. P. 145–158. doi: 10.1177/0309364611432794
9. Developments in the transtibial prosthetic socket fitting process: A review of past and present research / P. Sewell, S. Noroozi, J. Vinney, S. Andrews // *Prosthetics and Orthotics International*. 2000. Vol. 24, iss. 2. P. 97–107. doi: 10.1080/03093640008726532
10. Structure. What are Structure Core's technical specifications? URL: <https://support.structure.io/article/307-what-are-structure-cores-technical-specifications> (дата обращения 03.10.2023)
11. Peyr'e G. The numerical tours of signal processing-advanced computational signal and image processing // *IEEE Computing in Science and Engineering*. 2011. Vol. 13, iss. 4. P. 94–97. doi: 10.1109/MCSE.2011.71
12. Geometric and Learning-based Mesh Denoising: A Comprehensive Survey / H. Chen, Zh. Li, M. Wei, J. Wang // *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*. 2022. Vol. 20, iss. 3. Art. № 85. P. 1–28. doi: 10.1145/3625098
13. Mesh denoising by improved 3D geometric bilateral filter / S. Dutta, S. Banerjee, P. K. Biswas, P. Bhowmick // *Fourth National Conf. on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics (NCVPRIPG)*, Jodhpur, India, 18–21 Dec. 2013. IEEE, 2013. P. 1–4. doi: 10.1109/NCVPRIPG.2013.6776193
14. Zhang Y., Hamza A. B. Vertex-based anisotropic smoothing of 3D mesh data // *Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, Canada, 07–10 May 2006. IEEE, 2006. P. 202–205. doi: 10.1109/CCECE.2006.277433
15. Yagou H., Ohtake Y., Belyaev A. Mesh smoothing via mean and median filtering applied to face normal // *Geometric modeling and processing. Theory and applications. Proc. of GMP 2002*, Wako, Japan, 10–12 July 2002. IEEE, 2002. P. 124–131. doi: 10.1109/GMAP.2002.1027503

Информация об авторах

Суфэльфа Алиса Родионовна – руководитель лаборатории инновационных и реабилитационно-экспертных технологий ФГБУ ФНОЦ МСЭ и Р им. Г. А. Альбрехта Минтруда России. Соискатель кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – протезирование; ортезирование; автоматизация; биомеханика; системы поддержки принятия решений. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: arsufelfa@stud.etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5672-7290>

Вознесенский Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2022), старший научный сотрудник НОЦ ЦТТ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; изображений и видео; анализ данных; нейронные сети; машинное обучение; искусственный интеллект. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: asvoznenskiy@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0667-7851>

Каплун Дмитрий Ильич – кандидат технических наук (2009), доцент кафедры автоматики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 100 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; адаптивная обработка сигналов, обработка изображений и видео, проектирование фильтров, система остаточных классов; аппаратная реализация фильтров; ПЛИС; ЦПОС; SoC.

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

E-mail: dikaplun@etu.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-2765-4509>

References

1. Goldberg C. J., Moore D. P., Fogarty E. E., Dowling F. E. Adolescent Idiopathic Scoliosis: the Effect of Brace Treatment on the Incidence of Surgery. *Spine*. 2001, vol. 26, no. 1, pp. 42–47. doi: 10.1097/00007632-200101010-00009
2. Condie E., Scott H., Treweek Sh. Lower Limb Prosthetic Outcome Measures: a Review of the Literature 1995 to 2005. *J. of Prosthetics and Orthotics*. 2006, vol. 18, iss. 6, pp. 13–45. doi: 10.1097/00008526-200601001-00004
3. World Health Organization. Guidelines for training personnel in developing countries for prosthetics and orthotics services. Available at: https://www.afro.who.int/sites/default/files/2017-06/who_guidelines_training_personnel_en.pdf (accessed 11.10.2024)
4. Ikeda A. J., Grabowski A. M., Lindsley A., Sadeghi-Demneh E., Reisinger K. D. A Scoping Literature Review of the Provision of Orthoses and Prostheses in Resource-Limited Environments 2000–2010. Part two: research and outcomes. *Prosthetics and Orthotics International*. 2014, vol. 38, iss. 5, pp. 343–362. doi: 10.1177/0309364613490443
5. 3DToday 3D Systems iSense. Available at: <https://3dtoday.ru/3d-scanners/3d-systems/isense> (accessed 11.10.2024)
6. MeshLab 2022.02 Release Notes. Official GitHub Repository. Available at: <https://github.com/cnr-isti-vclab/meshlab> (accessed 02.08.2023)
7. Rogers B., Bosker G. W., Crawford R. H., Faustini M. C., Neptune R. R., Walden G., Gitter A. J. Advanced Trans-Tibial Socket Fabrication Using Selective Laser Sintering. *Prosthetics and Orthotics International*. 2007, vol. 31, no. 1, pp. 88–100. doi: 10.1080/03093640600983923
8. Samuelsson K. A. M., Töytä O., Salminen A.-L., Brandt Å. Effects of Lower Limb Prosthesis on Activity, Participation, and Quality of Life: a Systematic Review. *Prosthetics and Orthotics International*. 2012, vol. 36, iss. 2, pp. 145–158. doi: 10.1177/0309364611432794
9. Sewell P., Noroozi S., Vinney J., Andrews S. Developments in the Transtibial Prosthetic Socket Fitting Process: a Review of Past and Present Research. *Prosthetics and Orthotics International*. 2000, vol. 24, iss. 2, pp. 97–107. doi: 10.1080/03093640008726532
10. Structure. What are Structure Core's technical specifications? Available at: <https://support.structure.io/article/307-what-are-structure-cores-technical-specifications> (accessed 03.10.2023)
11. Peyr'e G. The Numerical Tours of Signal Processing-Advanced Computational Signal and Image Processing. *IEEE Computing in Science and Engineering*. 2011, vol. 13, iss. 4, pp. 94–97. doi: 10.1109/MCSE.2011.71
12. Chen H., Li Zh., Wei M., Wang J. Geometric and Learning-based Mesh Denoising: A Comprehensive Survey. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*. 2022, vol. 20, iss. 3, art. no. 85, pp. 1–28. doi: 10.1145/3625098
13. Dutta S., Banerjee S., Biswas P. K., Bhowmick P. Mesh Denoising by Improved 3D Geometric Bilateral Filter. *Fourth National Conf. on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics (NCVPRIPG)*, Jodhpur, India, 18–21 Dec. 2013. *IEEE*, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/NCVPRIPG.2013.6776193
14. Zhang Y., Hamza A. B. Vertex-Based Anisotropic Smoothing of 3D Mesh Data. *Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, Canada, 07–10 May 2006. *IEEE*, 2006, pp. 202–205. doi: 10.1109/CCECE.2006.277433
15. Yagou H., Ohtake Y., Belyaev A. Mesh Smoothing via Mean and Median Filtering Applied to Face Normal. *Geometric Modeling and Processing. Theory and Applications. Proc. of GMP 2002*, Wako, Japan, 10–12 July 2002. *IEEE*, 2002, pp. 124–131. doi: 10.1109/GMAP.2002.1027503

Information about the authors

Alisa R. Sufelfa, Head of Laboratory of Albrecht Federal Scientific and Educational Centre of Medical and Social Expertise and Rehabilitation. Postgraduate student of Department of biotechnical systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: prosthetics; orthotics; automation; biomechanics; decision support systems.

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

E-mail: arsufelfa@stud.etu.ru;

<https://orcid.org/0000-0001-5672-7290>

Alexander S. Voznesensky, Cand. Sci. (2022), senior researcher of SEC DTT of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal; image and video processing; data science; neural networks; machine learning; artificial intelligence.

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

E-mail: asvoznenskiy@etu.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-0667-7851>

Dmitry I. Kaplun, Cand. Sci. (2009), Associate Professor of Department of automation and processing of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 100 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; adaptive signal processing; image and video processing; filter design; residual class system; hardware implementation of filters; FPGA; CPU; SoC.

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

E-mail: dikaplun@etu.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-2765-4509>

Обоснование структуры форматов изображений для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге

Д. В. Васильева^{1✉}, С. В. Дворников^{1,2}, С. С. Дворников^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

² Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

✉ dolli.dina@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время важнейшей задачей является экологический мониторинг акваторий морей и океанов и своевременное выявление на поверхности воды результатов техногенных катастроф, в том числе обнаружение загрязнения нефтепродуктами. Для эффективного выполнения данной задачи проводится контроль над акваториями морей и океанов с использованием средств космического и воздушного базирования. Однако из-за того, что водная поверхность занимает большую часть общей площади планеты, объем подлежащих контролю данных становится запредельно большим. Данная проблема решается с помощью отбора только тех фото- и видеоматериалов, на которых обнаружены следы разливов нефтепродуктов и других техногенных катастроф.

Цель работы. Разработка научно-технического подхода, позволяющего автоматически осуществлять выборку изображений, полученных с систем видового контроля, предоставляя только актуальные изображения.

Материалы и методы. В теоретической части исследования применяется метод классификации на основе методов теории распознавания образов. Сравнивалось тестовое изображение, на котором присутствует разлив нефтепродуктов на поверхности Черного моря, с этим же изображением, представленным в формате BMP с разными кодировками глубины цвета, а также с этим же изображением, представленным в формате JPEG. В ходе работы использовалась ЭВМ для обработки растровых изображений. Моделирование проводилось в среде САПР MathCAD.

Результаты. Для подтверждения результата проведен эксперимент с 200 изображениями. В результате визуального анализа можно заключить, что наиболее близко к тестовому изображению изображение в формате JPEG, на котором приведенная граница позволяет четко выделить зону разлива нефтепродуктов.

Заключение. По результатам эксперимента с различными форматами файлов растровых изображений в качестве исходных данных представляется необходимым использовать изображения, полученные с помощью систем визуального контроля, представленные в формате JPEG. Сформированы направления дальнейшего исследования.

Ключевые слова: формат файлов, растровые изображения, разлив нефтепродуктов, цифровые матрицы

Для цитирования: Васильева Д. В., Дворников С. В., Дворников С. С. Обоснование структуры форматов изображений для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 118–128. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-118-128

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.07.2024; принята к публикации после рецензирования 17.09.2024; опубликована онлайн 29.11.2024

Justification of Image Format Structure for Solving Pattern Recognition Problems in Environmental Monitoring

Dina V. Vasilieva^{1✉}, Sergey V. Dvornikov^{1,2}, Sergey S. Dvornikov^{1,2}

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

² Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

✉ dolli.dina@mail.ru

Abstract

Introduction. Environmental monitoring of marine areas and timely detection of the results of man-made disasters on the water surface, including identification of oil contaminated areas, represents an urgent task. To facilitate its solution, marine areas are controlled using space and airborne means. However, the volume of data subject to control is constantly growing. Therefore, the problem can be solved by selecting only those photo and video materials with detected traces of oil spills and other man-made disasters.

Aim. To develop an approach to automatic selection of images obtained from visual control systems, providing only relevant images.

Materials and methods. The theoretical part of the study was carried out using a classification method based on pattern recognition theory. A test image with an oil spill on the surface of the Black Sea was compared with the same image presented in BMP format with different color depth encodings, as well as with the same image presented in JPEG format. Raster images were processed using a specialized software application. Simulation was carried out in the MathCAD environment.

Results. The developed approach was tested experimentally by processing 200 images. The conducted visual analysis confirmed that the image, where the given boundary allows the area of oil spill to be clearly distinguishes, is the closest to the test image.

Conclusion. According to the results of the experiment with different formats of raster image files, the conclusion is made about the feasibility of using images obtained by visual control systems presented in JPEG format as initial data. Further research directions are outlined.

Keywords: file format, raster images, oil product spill, digital matrices

For citation: Vasilieva D. V., Dvornikov S. V., Dvornikov S. S. Justification of Image Format Structure for Solving Pattern Recognition Problems in Environmental Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 118–128. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-118-128

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

Submitted 08.07.2024; accepted 17.09.2024; published online 29.11.2024

Введение. Одной из первостепенных задач экологического мониторинга является своевременное выявление результатов техногенных катастроф, в том числе обнаружение загрязненных нефтепродуктами акваторий морей и океанов [1]. С этой целью активно используют средства космического и воздушного базирования, осуществляющие видовой контроль над акваториями морей и океанов.

Однако, учитывая, что водная поверхность занимает порядка 70 % общей площади планеты, объем подлежащих контролю данных становится запредельно большим [2]. Поэтому необходима разработка научно-технических подходов, позволяющих в автоматическом режиме осуществлять селекцию входных данных, предоставляя оператору с бортовых систем видовой контроля лишь актуальные изображения [3].

Обоснование структуры форматов изображений

для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге

Justification of Image Format Structure for Solving Pattern Recognition Problems in Environmental Monitoring

Один из таких подходов базируется на решении задачи распознавания образов [4, 5], предполагающей отбор только того фото- и видеоконтента, на котором запечатлены следы техногенных аварий или результаты их последствий [6].

Сложность решения такой задачи обусловлена объемом обрабатываемых данных, представляемых в виде кадров изображений. Поэтому в рамках настоящей статьи представлены результаты анализа форматов файлов растровых изображений и предложения по их использованию в комплексах видового контроля систем экологического мониторинга.

Анализ структуры и параметров форматов данных изображений. Предварительный анализ результатов, представленных в [7], показал, что использование потокового видео для решения задач экологического мониторинга оправданно лишь в том случае, когда видеоряд непосредственно поступает на монитор оператора. Оператор непосредственно по результатам наблюдения принимает решение о наличии или отсутствии разливов нефтепродуктов.

Использование ЭВМ для обработки изображений предполагает необходимость их преобразования в один из форматов изображения. Следовательно, необходимо определиться с выбором формата представления данных обрабатываемого изображения для постов экологического мониторинга.

Согласно [8, 9] под форматом файла изображения понимают "стандартизированные средства организации и хранения цифровых изображений", т. е. любой формат фактически представляет собой файл цифровых данных, характеризующих изображение, с определенными параметрами.

В общем случае изображения могут быть представлены в векторной или растровой форме.

К векторным форматам относят такие форматы изображений, как EPS, PDF, SVG, CDR Век,

AI [10]. Такие форматы содержат геометрическое описание, которое может быть плавно отображено на любом размере дисплея. Векторные форматы, как правило, используются для отображения изображений на экранах мониторов. Среди векторных форматов изображений наибольшее распространение получил формат PDF [10, 11, 14]. Поскольку векторные данные в основном применяются в приложениях графического дизайна и не описывают характеристики каждого пикселя изображения, то их применение в решении задач обнаружения последствий техногенных катастроф видится нецелесообразным.

К форматам файлов растровых изображений относят следующие форматы: GIF, TIFF, PNG, PSD, RAW, BMP, JPEG [8, 14–20]. Главным достоинством растровых изображений является то, что размер их файлов коррелирует не только с общим количеством пикселей изображения, но и глубиной цвета, приходящейся на пиксель.

Так, изображение размером 640×480 пикселей с 24-битным цветом $k_{\text{ц}}$ приводит к формированию файла размером $(V_{\text{ф}}) 640 \times 480 \times 24 = 7\,372\,800$ бит = 921 600 байт.

В то же время при кодировании изображения 4-разрядным кодом получим файл размером всего $640 \times 480 \times 8 = 7\,372\,800$ бит = 153 600 байт, т. е. чем ниже разряд кода, тем меньше размер результирующего файла.

При этом следует учитывать, что количество отображаемых цветов $(N_{\text{ц}})$ на изображении как раз и зависит от глубины цвета $(k_{\text{ц}})$ [19]:

$$N_{\text{ц}} = 2^{k_{\text{ц}}}.$$

Следовательно, чем больше глубина цвета, тем детальней будет отображено изображение совокупностью цифровых данных.

Так, в табл. 1 представлены значения размера файла и количество отображаемых цветов

Табл. 1. Размер файла и количество отображаемых цветов в зависимости от величины кода, определяющего глубины цвета

Tab. 1. File size and number of displayed colors, depending on the value of the code defining color depths

Параметр	Разрядность кода глубины цвета ($k_{\text{ц}}$)					
	4	8	16	24	32	48
$N_{\text{ц}}$	16	256	65 536	16 777 216	4 294 967 296	281 474 976 710 656
$V_{\text{ф}}$, Кбайт	153.6	921.6	1843.2	2764.8	3686.4	5529.6

($N_{\text{ц}}$) в зависимости от величины кода, определяющего глубины цвета ($k_{\text{ц}}$), для изображения размером 640×480 пикселей [21].

Анализ результатов табл. 1 позволяет сделать следующее заключение. Поскольку человеческий глаз теоретически способен различать не более 10 000 000 цветовых градаций [20], то использование разрядности кода свыше $k_{\text{ц}} > 24$ нецелесообразно.

Однако на практике установлено [22], что в среднем для понятия и осознания сущности образа, представленного на изображении, среднестатистический человек осознанно различает не более 150 или 200 оттенков цветов. Лишь при усиленной тренировке можно выработать способность различать до 500 оттенков серого цвета [23]. При этом качество изображения в большей степени зависит не от цветности материала, а от разрешающей способности.

Рассмотрим наиболее важные особенности растровых форматов представления изображений.

Формат GIF (Graphics Interchange Format) [15, 20] предназначен для хранения данных, в которых каждый пиксель имеет размер не более 8 бит, что позволяет отображать изображения посредством 256 различных цветов и оттенков.

В формате GIF предусмотрена компрессия изображений на основе алгоритма сжатия данных без потери качества Лемпеля–Зива–Уэлча (ЛЗУ) [24].

Ввиду ограниченности цветопередачи формат GIF фактически не используется для отображения полноцветных объектов, поскольку формируемые на его основе изображения получают ярко выраженную зернистость.

С учетом рассмотренных особенностей применение формата GIF для представления обрабатываемых изображений в комплексах экологического мониторинга видится нецелесообразным.

Формат TIFF (Tagged Image File Format) [16] обеспечивает представление и хранение данных растровых графических изображений с большой глубиной цветовой гаммы. Качественная цветопередача изображений определила выбор TIFF в качестве основного графического формата для операционной системы NeXTSTEP [25].

Формат TIFF поддерживает режимы представления целочисленных данных, в которых

пиксель представляется 8, 16, 32 и 64 битами. При использовании матриц, в которых значение пикселей представляется числами с плавающей запятой, как правило, кодировка осуществляется 32 или 64 битами.

Несмотря на то что в данном формате компрессия изображений осуществляется на основе метода ЛЗУ, TIFF не поддерживает перспективный алгоритм сжатия, реализованный в стандарте JPEG-LS (Joint Photographic Experts Group – Lossless Compression Standard) [26], который основан на адаптивном предсказании значения текущего пикселя.

В указанном алгоритме для определения значения текущего пикселя используются результаты расчета значений близлежащих пикселей, проведенных ранее, по так называемому методу обнаружения медианного края (англ. Median Edge Detection).

С учетом выявленных фактов формат TIFF не рекомендуется для предоставления изображений в комплексах экологического мониторинга.

Формат PNG (Portable Network Graphics) базируется на применении алгоритма сжатия без потерь Deflate, сочетающего в себе комбинацию тестов LZ77 и Хаффмана [17], хорошо известных по архиваторам семейства ZIP (PKZIP, GZIP, 7-ZIP и др.).

Формат PNG разрабатывался с перспективой замены излишне упрощенного формата представления изображений посредством GIF и слишком сложного для обычного применения формата TIFF [16].

При этом формат PNG ориентирован на поддержку таких получивших широкое практическое применение растровых типов изображений, как:

- полноцветные, в которых глубина цвета кодируется посредством 48 бит;
- индексированные цветные с 8-битовой палитрой градаций;
- полутоновые изображения с глубиной цвета 16 бит.

По отношению к рассмотренным форматам формат PNG обеспечивает наилучшую степень сжатия для изображений с высокой степенью градаций яркости. При этом степень сжатия на 5–25 % превышает обеспечиваемую в формате GIF.

Однако для практики этого достоинства оказалось недостаточно, поскольку для изображе-

ний с относительно небольшой глубиной градаций яркости на уровне, не превышающем 16 бит, формат PNG демонстрирует достаточно посредственные компрессионные свойства.

Формат PSD (Photoshop Document) был создан специально для программы Adobe Photoshop. Поэтому, несмотря на явные достоинства, заключающиеся в возможности сохранения слоев и папок, а также в наличии градаций уровня прозрачности и векторных графических элементов, он не нашел широкого применения в других приложениях, даже при том, что обеспечивает высокую компрессию изображений без потери качества [23].

Следовательно, рассматривать данный формат в качестве инструмента представления и сохранения изображений для решения задач экологического мониторинга нецелесообразно.

Формат RAW (Raw) предназначен для хранения и отображения необработанных данных об электрических сигналах, поступающих с фотоматриц цифровых устройств, в том числе со сканеров и киноплёнок [20]. При этом содержащиеся в формате данные не отображают в явном виде изображения, но содержат всю необходимую информацию для их восстановления.

При этом непосредственно применение RAW-файлов для отображения изображений невозможно ввиду того, что в большинстве современных фотоматриц используют фильтр Байера. Программного обеспечения, позволяющего напрямую редактировать RAW-файлы, пока не существует [20]. Кроме того, форматы RAW отличаются не только у производителей, но их структура различается в зависимости от моделей камер. При этом избыточность формата RAW приводит к созданию файлов большого объема, значительно большего, чем в формате JPEG.

Среди растровых форматов наиболее точно изображение передает *формат BMP* (Bitmap Picture) без использования алгоритмов сжатия. Данный формат сохраняет изображение в виде однослойного раstra, в котором глубина цвета определяется 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 48 или 64-разрядным кодом. Поэтому параметры формируемых файлов с расширением *.bmp соответствуют данным табл. 1 при соответствующем размере файла.

Вместе с тем на практике широкое распространение получил растровый *формат JPEG*, по-

лучивший свое название по аббревиатуре разработавшей его компании (Joint Photographic Experts Group). Данный формат предусматривает сжатие как без потерь в информации, так и с потерями.

Если алгоритм сжатия без потерь позволяет уменьшить объем данных всего на 10–40 %, то коэффициент сжатия алгоритма с потерями может составлять 100 : 1 [27, 28]. При этом наибольшее распространение получили JPEG-кодеки, в которых глубина цвета изображения представляется 8 битами.

Выбор и обоснование формата для обработки данных изображений разливов нефтепродуктов. В рамках проведенного анализа установлено, что наилучшую передачу изображений обеспечивает формат BMP. Однако формируемые на его основе файлы имеют большие размеры (см. табл. 1), что может создать трудности при их передаче по радиоканалам. Поэтому предпочтение отдано формату JPEG, позволяющему уменьшить объем файлов изображений в 100 раз за счет их сжатия. Так как алгоритмы сжатия приводят к потере информации, содержащейся в изображении, то необходимо провести дополнительный анализ для выявления того, насколько существенны потери в информативности изображений, вызванные их сжатием, для решения задач обнаружения разливов нефтепродуктов.

Для этого необходимо оценить качество изображения с различными значениями параметров представления данных.

Поскольку было установлено, что предельное значение различия цветов человеческим глазом составляет не более 10 000 000, то в качестве эталонного определим изображение формата BMP, в котором глубина цвета кодируется 24 битами. Будем рассматривать тестовое изображение размером 1252×751 пикселей при $k_{\text{ц}} = 24$ (далее по тексту – ТИ-00), на котором фиксируется разлив нефтепродуктов на поверхности Черного моря.

ТИ-00 будем сравнивать с этим же изображением, но представленным в формате BMP при $k_{\text{ц}} = 8$ (далее по тексту – ТИ-01), при $k_{\text{ц}} = 4$ (далее по тексту – ТИ-02), при $k_{\text{ц}} = 2$ (далее по тексту – ТИ-03), а также с этим изображением, представленным в формате JPEG (далее по тексту – ТИ-04).



Рис. 1. Изображение ТИ-00 с разливом нефтепродуктов
Fig. 1. Image of TI-00 with oil product spill

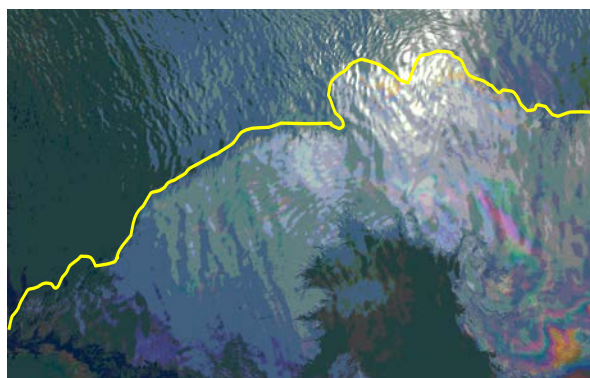


Рис. 2. Изображение ТИ-01 с разливом нефтепродуктов
Fig. 2. Image of TI-01 with oil product spill

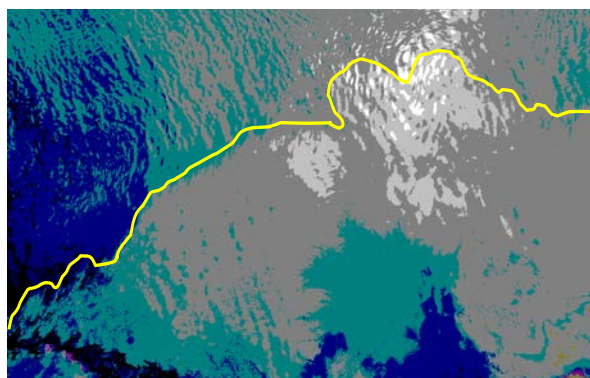


Рис. 3. Изображение ТИ-02 с разливом нефтепродуктов
Fig. 3. Image of TI-02 with oil product spill

Указанные изображения представлены на рис. 1–5. Для наглядности на каждом изображении нанесена граница зоны, позволяющая на основе визуального анализа принять решение: наличие артефактов вызвано разливом нефтепродуктов; наличие артефактов обусловлено различиями в освещенности поверхности моря.

По результатам визуального анализа можно заключить, что наиболее близко к тестовому изображению ТИ-00 только изображение ТИ-04, на котором приведенная граница позволяет

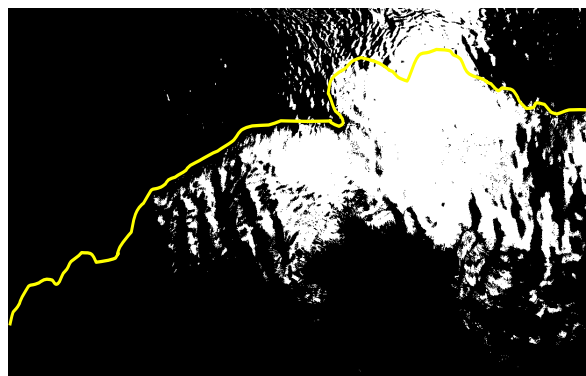


Рис. 4. Изображение ТИ-03 с разливом нефтепродуктов
Fig. 4. Image of TI-03 with oil product spill



Рис. 5. Изображение ТИ-04 с разливом нефтепродуктов
Fig. 5. Image of TI-04 with oil product spill

четко выделить зону разлива нефтепродуктов. На остальных изображениях артефакты, обусловленные различиями в степени освещенности, имеют близкую структуру с артефактами, вызванными разливом нефтепродуктов.

Для подтверждения результата эксперимент был проведен с 200 изображениями. В табл. 2 представлены параметры тестируемых изображений.

Для лучшей наглядности полученных результатов на рис. 6–9 демонстрируются нормированные цифровые матрицы тестовых изображений ТИ-00, ТИ-04, ТИ-03 и ТИ-02.

На представленных трехмерных матрицах, несмотря на то что ось аппликата нормирована к единице, амплитудные различия ее элементов варьируются в пределах градаций яркости.

Следует отметить, что, несмотря на различия форматов представления изображений, все матрицы, изображенные на рис. 6–9, имеют одинаковую размерность 1252×751 , т. е. содержат 940 252 элемента, поскольку выполнены в формате градаций оттенков серого (полутонные изображения).

Табл. 2. Параметры тестируемых изображений

Tab. 2. Parameters of tested images

Параметр	Формат BMP				Формат JPG
$k_{ц}$	2	4	8	24	24
$N_{ц}$	16	256	65 536	4 294 967 296	4 294 967 296
$V_{ф}$, Кбайт	117	460	919	2921	643

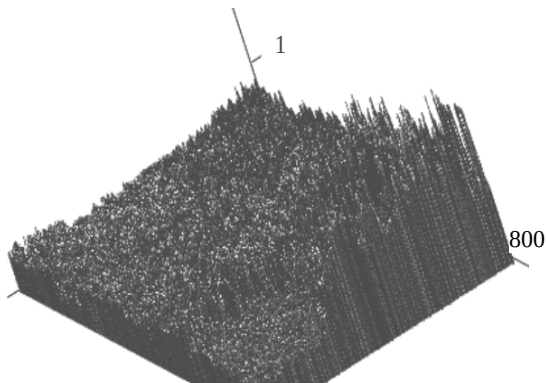


Рис. 6. Цифровая матрица изображения ТИ-00 с разливом нефтепродуктов
Fig. 6. Digital image matrix of TI-00 image with oil product spillage

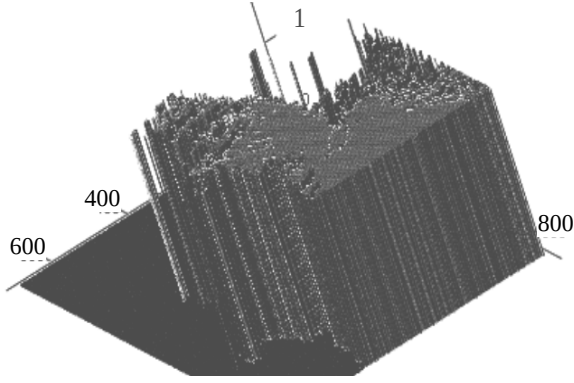


Рис. 8. Цифровая матрица изображения ТИ-03 с разливом нефтепродуктов
Fig. 8. Digital image matrix of TI-03 image with oil product spillage

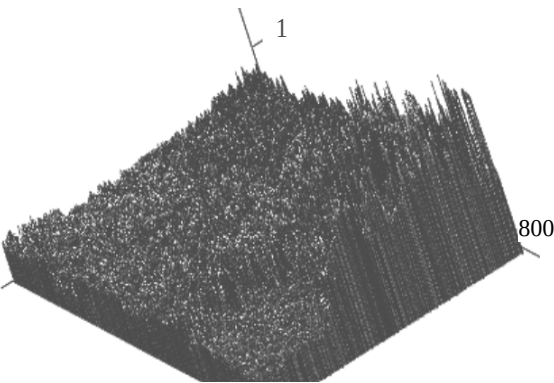


Рис. 7. Цифровая матрица изображения ТИ-04 с разливом нефтепродуктов
Fig. 7. Digital image matrix of TI-04 image with oil product spillage

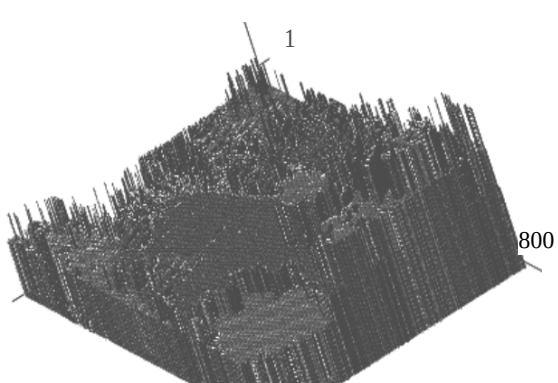


Рис. 9. Цифровая матрица изображения ТИ-02 с разливом нефтепродуктов
Fig. 9. Digital image matrix of TI-02 image with oil product spillage

При этом качество изображения определяется размерностью элементов по оси аппликат (ось амплитудных значений), от которой как раз и зависит объем формируемого файла.

Представленные цифровые матрицы характеризуют уровень и объем данных, подверженных обработке.

Закключение. Следует отметить, что для изображения ТИ-03, которое даже потенциально сложно рассматривать в качестве приемлемого для решения задачи обнаружения разливов нефтепродуктов, объем представляемых данных аналогичен объему, представляемому матрицей на основе формата BMP при $k_{ц} = 24$.

Различия лишь в дискретности амплитудных значений каждого из 940 252 компонентов матрицы цифровых данных. И если у ТИ-00 каждый отчет имеет 4 294 967 296 амплитудных градаций, то у матрицы ТИ-03 таких градаций всего 16.

Таким образом, анализ результатов табл. 2 и рис. 6–9 обуславливает выбор в качестве исходных данных изображений, получаемых с систем визуального мониторинга, размещенных на летно-подъемных платформах, представленных в формате JPEG.

Формат JPEG, сохраняя структуру данных, характерную для формата BMP, занимает объем чуть более чем в 5 раз превышающий объем

изображения ТИ-03.

Дальнейшие исследования, по мнению авторов, должны быть связаны с разработкой методики, обеспечивающей автоматическое рас-

познавание мест разливов нефтепродуктов. В основу методики будут положены подходы, использованные для построения классификаторов, представленных в [29–33].

Список литературы

1. Свецкий А. В. Правовая охрана морской среды от разливов нефти и нефтепродуктов // Юридические исследования. 2023. № 3. С. 1–12. doi: 10.25136/2409-7136.2023.3.39944.

2. Алексеев Д. В., Лентарев А. А. Статистический анализ разливов нефти и нефтепродуктов на море // Вестн. ГУ морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2023. Т. 15, № 6. С. 959–970. doi: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970

3. Аббасов И. Б. Современные тенденции мониторинга водной среды прибрежных акваторий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 1. С. 29–39. doi: 10.22449/2413-5577-2019-1-29-39

4. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований / С. В. Дворников, Д. В. Степынин, А. С. Дворников, А. П. Букарева // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 46–49.

5. Дворников С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) // Тр. учеб. заведений связи. 2018. Т. 4, № 1. С. 47–60.

6. Дворников С. В., Дворников С. С., Васильева Д. В. Автоматизация процедур обнаружения нефтяных разливов на водной поверхности // Информация и космос. 2024. № 1. С. 126–132.

7. Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Аналитическая оценка при решении задач экологического мониторинга с использованием информационных технологий на примере полигона ТБО "Тимохово" // Экология промышленного производства. 2024. № 1(125). С. 38–44. doi: 10.52190/2073-2589_2024_1_38

8. Гусев С. С. Векторизация растровых изображений // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 4. С. 83–98. doi: 10.15593/2499-9873/2018.4.05

9. Горячкин Б. С., Можаяев Д. В., Андрианов А. А. Сравнительный анализ различных форматов изображения в контексте веб-приложения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. 2023. № 6. С. 83–91. doi: 10.37882/2223-2966.2023.06.11

10. Савко А. А., Акинина Ю. С., Аралов М. Н. Преобразование графических файлов в формат pdf // Науч. опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса НИР студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ВГТУ, 2021. С. 158–163.

11. Сергеев А. В., Хорев П. Б. Обзор и анализ стеганографических методов в документах формата

PDF // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2020. № 8. С. 382–387.

12. Автоматизированная система векторизации растровых изображений / А. Р. Исмаилов, А. П. Кирпичников, С. А. Ляшева, М. П. Шлеймович // Вестн. Технологического ун-та. 2018. Т. 21, № 9. С. 136–140.

13. Image vectorization: a review / M. O. Dziuba, I. Jarsky, V. Efimova, A. A. Filchenkov // Zap. nauchnyh sem. SPb otdeleniya matematicheskogo instituta im. V. A. Steklova RAN. 2023. Vol. 530. P. 6–23.

14. Мерзлякова Е. Ю. Разработка метода встраивания информации в растровые изображения с помощью интерполяции Лагранжа и кривых Безье // Вестн. СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 3. С. 12–22. doi: 10.55648/1998-6920-2023-17-3-12-22

15. Босиков Д. Н., Гуфан А. Ю., Елисеев А. С. Метод хрупкой маркировки изображений и анимаций в формате GIF без потерь данных // Телекоммуникации. 2013. № 12. С. 19–28.

16. Анализ организации файловой структуры формата TIFF с точки зрения стеганографического контейнера / С. В. Радаев, В. А. Иванов, А. А. Двилянский, А. А. Адарацкий // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 6. С. 40–46.

17. Губницкая Ю. С., Писаревский Н. Я. Проблема использования форматов PNG и JPG, игнорируя технические особенности SVG // Информатика, математическое моделирование, экономика: сб. науч. ст. по итогам Пятой междунар. науч.-практ. конф. 2015. Смоленск: Автономная НОО ВО центрального союза РФ "Российский университет кооперации". Смоленский филиал, 2015. С. 257–262.

18. Студеникин В. А., Малышев А. С., Фокина Г. В. Компьютерная графика: растровая графика, сравнение растровых графических редакторов // Материалы секционных заседаний 62-й студ. науч.-практ. конф. ТОГУ. Хабаровск: ТОГУ, 2022. С. 134–139.

19. Пальчикова И. Г., Смирнов Е. С. Пороги цветоразличения в модели RGB с глубиной цвета 8 бит // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5, № 2. С. 30–35.

20. Арапов С. Ю., Арапова С. П., Тягунов А. Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъемки на основе стандартной цифровой камеры // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.

21. Al-khazraji S. H., Khalil M. M., Khalil A. I. A Biomedical Application Software for Measuring Particles Sizes in Electro-Microscopic Images // Intellectual Technologies on Transport. 2023. № 3 (35). P. 38–43. doi: 10.24412/2413-2527-2023-335-38-43

22. Sheikh H. R., Bovik A. C. Image information and visual quality // IEEE Transactions on Image Pro-

Обоснование структуры форматов изображений

для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге

Justification of Image Format Structure for Solving Pattern Recognition Problems
in Environmental Monitoring

cessing. 2006. Vol. 15, iss. 2. P. 430–444. doi: 10.1109/tip.2005.859378

23. Потапов В. С. Реализация алгоритма преобразования классического изображения в квантовое состояние, выделения границ и преобразования полутонового изображения в бинарное // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2019. № 3 (205). С. 43–50. doi: 10.23683/2311-3103-2019-3-43-51

24. Performance improvement of Lempel-Ziv-Welch compression algorithm / S. L. Frenkel, M. Kopeetsky, R. Molotkovsky, P. Borovsky // Informatics and Applications. 2015. Vol. 9, № 4. P. 78–84. doi: 10.14357/1992264150408

25. Базеева Н. А., Холодова Е. А., Радаев К. Д. Сравнение современных операционных систем. Личное и производственное пользование // E-Scio. 2020. № 6 (45). С. 638–643.

26. Ключеня В. В. Проектирование процессора вычисления дискретного косинусного преобразования для систем сжатия изображения по схеме losless-to-lossy // Докл. БелГУ информатики и радиоэлектроники. 2021. Т. 19, № 3. С. 5–13. doi: 10.35596/1729-7648-2021-19-3-5-13

27. Анализ алгоритмов сжатия изображений JPEG и JPEG 2000 / П. С. Быковский, В. А. Ляшенко, А. А. Липницкий, М. А. Пак // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 6–2 (62). С. 23–32.

28. Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразований / А. А. Умбиталиев, С. В. Дворников, И. Н. Оков, А. А. Устинов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. № 3. С. 100–106.

29. Автоматизация процедур обнаружения лесных пожаров по результатам обработки видео / Д. В. Васильева, С. В. Дворников, С. А. Якушенко, С. С. Дворников // Науч.-аналит. журн. Вестн. СПбУ ГПС МЧС России. 2023. № 4. С. 47–58.

30. Пугин Е. В. Обзор методов и алгоритмов обработки последовательностей цифровых изображений // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2014. № 3 (28). С. 50–59.

31. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения / Д. В. Васильева, С. С. Дворников, Ю. Е. Толстуха, П. С. Обрезков, С. В. Дворников // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2023. № 4. С. 62–68.

32. Громов Ю. Ю., Ищук И. Н., Родионов В. В. Применение искусственного интеллекта в задачах обработки данных дистанционного мониторинга // Тр. Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению (ГрафиКон 2023). 2023. № 33. С. 727–735. doi: 10.20948/graphicon-2023-727-735

33. Малыхина Г. Ф., Меркушева А. В. Совместное использование нейронной сети и вейвлет-преобразования при анализе нестационарного сигнала // Информационные технологии. 2008. № 7. С. 51–56.

Информация об авторах

Васильева Дина Владимировна – инженер по специальности "Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов" (2004, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)), старший преподаватель кафедры радиотехнических систем Института радиотехники и инфокоммуникационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: dolli.dina@mail.ru
<http://orcid.org/0009-0009-5343-3356>

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук (2009), профессор (2014), профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 553 научных работ. Сфера научных интересов – построение помехозащищенных систем радиосвязи; формирование и обработка сигналов сложных структур. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: practicdsv@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Дворников Сергей Сергеевич – кандидат технических наук (2019), доцент (2022) кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 200 научных работ. Сфера научных интересов – теория передачи сигналов; цифровая обработка сигналов; помехозащищенность каналов управления и связи радиотехнических систем. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: dvornik92@mail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

References

1. Svetsky A. V. Legal Protection of the Marine Environment from Oil and Petroleum Product Spills. Legal Studies. 2023, no. 3, pp. 1–12. doi: 10.25136/2409-7136.2023.3.39944 (In Russ.)
2. Alekseev D. V., Lentarev A. A Statistical Analysis of Oil and Oil Product Spills at Sea. Bull. of the State University of Sea and River Fleet n. a. Admiral S. O. Makarov. 2023, vol. 15, no. 6, pp. 959–970. doi: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970 (In Russ.)
3. Abbasov I. B. Modern Trends of Monitoring the Water Environment of Coastal Areas. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. 2019, no. 1, pp. 29–39. doi: 10.22449/2413-5577-2019-1-29-39 (In Russ.)
4. Dvornikov S. V., Stepynin D. V., Dvornikov A. S., Bukareva A. P. Formatoin of Vectors Signs Signals from Wavelet-Coefficients of Their Frame Transforms. Information Technologies. 2013, no. 5, pp. 46–49. (In Russ.)
5. Dvornikov S. V. Theoretical Foundations of the Synthesis of Bilinear Energy Distributions of Non-Stationary Processes in the Frequency-Temporary Space (Review). Proc. of Telecommunication Universities. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 47–60. (In Russ.)
6. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Vasilieva D. V. Automating Procedures of Oil Spills on the Water Surface. Information and Space. 2024, no. 1, pp. 126–132. (In Russ.)
7. Borisova O. N., Doronkina I. G. Analytical Assessment in Solving Environmental Monitoring Issues Using Information Technology on the Example of the Landfill of Household Waste "Timokhovo". Iindustrial Ecology. 2024, no. 1 (125), pp. 38–44. doi: 10.52190/2073-2589_2024_1_38 (In Russ.)
8. Gusev S. S. Vectorization of Raster Images. Applied Mathematics and Control Sciences. 2018, no. 4, pp. 83–98. doi: 10.15593/2499-9873/2018.4.05 (In Russ.)
9. Goryachkin B. S., Mozhaev D. V., Andrianov A. A. Comparative Analysis of Different Image Formats in the Context of a Web Application. Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2023, no. 6, pp. 83–91. doi: 10.37882/2223-2966.2023.06.11 (In Russ.)
10. Savko A. A., Akinina Yu. S., Aralov M. N. Preobrazovanie graficheskikh failov v format pdf [Conversion of Graphic Files into PDF Format]. Proc. of the Winners of the Competition of Research Works of Students and Graduate Students of VSTU on Priority Directions of Science and Technology Development. Voronezh State Technical University, 2021, pp. 158–163. (In Russ.)
11. Sergeev A. V., Khorev P. B. Review and Analysis of Steganographic Methods in PDF Documents. Information Technologies. Radioelectronics. Telecommunications. 2020, no. 8, pp. 382–387. (In Russ.)
12. Ismagilov A. R., Kirpichnikov A. P., Lyasheva S. A., Shleimovich M. P. The Automated System of the Raster Images Vectorization. Herald of Technological University. 2018, vol. 21, no. 9, pp. 136–140. (In Russ.)
13. Dziuba M. O., Jarsky I., Efimova V., Filchenkov A. A Image Vectorization: A Review. Notes of Scientific Seminars of the St Petersburg Branch of the
14. Merzlyakova E. Yu. Development of the Method for Embedding Information into Raster Images Using Lagrange Interpolation and Bezier Curves. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science. 2023, vol. 17, no. 3, pp. 12–22. doi: 10.55648/1998-6920-2023-17-3-12-22 (In Russ.)
15. Bosikov D. N., Gufan A. Yu., Eliseev A. S. Method of Fragile Labeling of Images and Animations in GIF Format without Data Loss. Telecommunications. 2013, no. 12, pp. 19–28. (In Russ.)
16. Radaev S. V., Ivanov V. A., Dvilyansky A. A., Adaratsky A. A. The Analysis of the Organization of the File Structure of the TIFF Format from the Point of View of the Steganographic Container. Industrial Automatic Control Systems and Controllers. 2017, no. 6, pp. 40–46. (In Russ.)
17. Gubnitskaya Yu. S., Pisarevsky N. Ya. Problema ispol'zovaniya formatov PNG i JPG, ignoriruya tekhnicheskie osobennosti SVG [The Problem of Using PNG and JPG Formats, Ignoring the Technical Features of SVG]. Informatics, Mathematical Modeling, Economics: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the 5th Intern. Scientific-Practical Conf., Smolensk, 11–15 May 2015. Smolensk, Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education of the Centrosoyuz of the Russian Federation "Russian University of Cooperation", 2015, pp. 257–262. (In Russ.)
18. Studenikin V. A., Malyshev A. S., Fokina G. V. Komp'yuternaya grafika: rastrovaya grafika, sravnenie rastrovyykh graficheskikh redaktorov [Computer Graphics: Raster Graphics, Comparison of Raster Graphic Editors]. Proc. of the Sectional Sessions of the 62nd Student Scientific and Practical Conf. of TOGU, Khabarovsk, 01–31 May 2022. Khabarovsk, TSU, 2022, pp. 134–139. (In Russ.)
19. Palchikova I. G., Smimov E. C. Color Separation Thresholds in RGB Model with Color Depth of 8 Bits. Inter-expo Geo-Siberia. 2017, vol. 5, no. 2, pp. 30–35. (In Russ.)
20. Arapov S. Yu., Arapova S. P., Tyagunov A. G. Experimental Complex for Multispectral Photography on the Basis of Standard Digital Camera. News of Higher Educational Institutions. Problems of Printing and Publishing. 2014, no. 5, pp. 45–54. (In Russ.)
21. Al-Khazraji S. H., Khalil M. M., Khalil A. I. A Biomedical Application Software for Measuring Particles Sizes in Electro-Microscopic Images. Intelligent Technologies in Transportation. 2023, no. 3(35), pp. 38–43. doi: 10.24412/2413-2527-2023-335-38-43
22. Sheikh H. R., Bovik A. C. Image Information and Visual Quality. IEEE Transactions on Image Processing. 2006, vol. 15, iss. 2, pp. 430–444. doi: 10.1109/tip.2005.859378
23. Potapov V. S. Implementation of the Algorithm for Transforming a Classical Image into a Quantum Condition, Allocation of Borders and Transformation of a Halftone Image to a Binary One. Izvestia YuFU.

Обоснование структуры форматов изображений

для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинге

Justification of Image Format Structure for Solving Pattern Recognition Problems
in Environmental Monitoring

Technical Sciences. 2019, no. 3 (205), pp. 43–50. doi: 10.23683/2311-3103-2019-3-43-51 (In Russ.)

24. Frenkel S. L., Kopeetsky M., Molotkovsky R., Borovsky P. Performance Improvement of Lempel-Ziv-Welch Compression Algorithm. Informatics and Applications. 2015, vol. 9, no. 4, pp. 78–84. doi: 10.14357/1992264150408

25. Bazeeva N. A., Kholodova E. A., Radaev K. D. Comparison of Modern Operating Systems. Personal and Industrial Use. E-Scio. 2020, no. 6 (45), pp. 638–643. (In Russ.)

26. Klucheny V. V. Design of a Discrete Cosine Transformation Processor for Image Compression Systems on a Lossless-to-Lossy Circuit. *Doklady BGUIR*. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 5–13. doi: 10.35596/1729-7648-2021-19-3-5-13 (In Russ.)

27. Bykovskiy P. S., Lyashenko V. A., Lipnitsky A. A., Pak M. A. Analysis of JPEG and JPEG 2000 Image Compression Algorithms. Actual Scientific Research in the Modern World. 2020, no. 6–2 (62), pp. 23–32. (In Russ.)

28. Umbitaliev A. A., Dvornikov S. V., Okov I. N., Ustinov A. A. Method of Compression of Graphic Files by Wavelet Transforms Methods. *Voprosy radioelektroniki*. Series: Television Technics. 2015, no. 3, pp. 100–106. (In Russ.)

29. Vasilyeva D. V., Dvornikov S. V., Yakushenko S., Dvornikov S. S. Automation of Forest Fires Detection Procedures Based on Video Processing Results. Scientific and Analytical Journal "Vestnik Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia". 2023, no. 4, pp. 30–40. (In Russ.)

30. Pugin E. V. Review of Methods and Algorithms for Processing Sequences of Digital Images. Algorithms, Methods and Systems of Data Processing. 2014, no. 3 (28), pp. 50–59. (In Russ.)

31. Vasilieva D. V., Dvornikov, S. V., Tolstukha Yu. E., Obrezkov P. S., Dvornikov, S. S. Formation of Feature Vectors for Video Surveillance Systems. *Voprosy radioelektroniki*. Series: Television Technics. 2023, no. 4, pp. 62–68. (In Russ.)

32. Gromov Yu. Yu., Ischuk I. N., Rodionov V. V. Application of Artificial Intelligence in Remote Monitoring Data Processing Tasks. GraphiCon". 2023, no. 33, pp. 727–735. doi: 10.20948/graphicon-2023-727-735 (In Russ.)

33. Malykhina G. F., Merkusheva A. V. Using the Neural Network and Wavelet Transformation Jointly for Nonstationary Signal Analysis. Information technologies. 2008, no. 7, pp. 51–56. (In Russ.)

Information about the authors

Dina V. Vasilieva, Engineer in chemical technology of refractory non-metallic and silicate materials (2004, Saint Petersburg State Technical University (TI), senior lecturer at the Department of Radio Engineering of Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing.
Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia
E-mail: dolli.dina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5343-3356>

Sergey V. Dvornikov, Dr Sci. (Eng.) (2009), Professor (2014) of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy, Professor of the Department of Radio-engineering and Fiber-optic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 553 scientific publications. Area of expertise: construction of noise-protected radio communication systems; formation and processing of signals of complex structures.
Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia
E-mail: practicdsv@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Sergey S. Dvornikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Research Associate of the Research Center of Military Telecommunications Academy. The author of 200 scientific publications. Area of expertise: theory of signal transmission; digital signal processing; noise protection of control and communication channels of radio-technical systems.
Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia
E-mail: dvornik92@mail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

Некролог

ПАМЯТИ ВИКТОРА МИХАЙЛОВИЧА УСТИНОВА



25 сентября 2024 г. на 67-м году жизни после тяжелой болезни скончался выдающийся специалист в области физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур, член-корреспондент РАН, лауреат Государственной премии РФ, премии Правительства Санкт-Петербурга, заместитель директора ФТИ им. А. Ф. Иоффе по научной работе (2009–2015), директор НТЦ микроэлектроники РАН, заведующий кафедрой оптоэлектроники, член редколлегии журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника" Виктор Михайлович Устинов.

Виктор Михайлович Устинов родился 01 июля 1958 г. Он был широко известным специалистом в области физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур, автором и соавтором более 550 научных работ, в том числе 1 монографии и 6 патентов.

В. М. Устинов работал в ФТИ им. А. Ф. Иоффе с 1981 г. после окончания с отличием базовой кафедры оптоэлектроники ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) при ФТИ им. А. Ф. Иоффе, которой впоследствии руководил. С 2016 г. возглавлял ФГБУН "Научно-технологический центр

микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук".

В. М. Устиновым были разработаны технология синтеза методом молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых гетероструктур с квантовыми точками, созданы инжекционные лазеры на квантовых точках для применений в системах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), по своим характеристикам превосходящие существующие в настоящее время лазеры на квантовых ямах. Впервые были созданы вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) на квантовых точках. Таким образом, были созданы научно-технологические основы для разработки полупроводниковых инжекционных лазеров нового поколения. За этот цикл работ В. М. Устинову в 2001 г. была присуждена Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники. В 2006 г. В. М. Устинов был избран членом-корреспондентом РАН.

В последние годы научная работа В. М. Устинова была сконцентрирована в области разработки технологии синтеза новых полупроводниковых материалов и светоизлучающих приборов на их основе. Была разработана технология получения полупроводниковых гетероструктур для малошумящих и мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем в см- и мм-диапазонах, генераторов, детекторов и умножителей частоты в ТГц-диапазоне.

Помимо работы в редколлегии журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника" В. М. Устинов являлся главным редактором журнала "Письма в ЖТФ".

В. М. Устинов был удостоен ряда международных и российских научных премий. В 2021 г. он получил премию Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты в области науки и техники в номинации "Нанотехнологии – премия им. Ж. И. Алфёрова".

Память о Викторе Михайловиче Устинове – замечательном ученом и талантливом организаторе науки – навсегда сохранится в наших сердцах.

Коллектив редакции журнала

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 и нижнее 2.5 см, левое и правое 2.25 см; колонтитулы – верхний 1.5 см, нижний 2.5 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.

2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).

2.2.5 – Приборы навигации.

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

2.2.7 – Фотоника.

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 27 № 5 2024

Vol. 27 No. 5 2024

Научные редакторы А. М. Мончак, П. В. Апалина
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка Е. И. Третьяковой

Science Editors A. M. Monchak, P. V. Apalina
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional E. I. Tretyakova

Подписано в печать 15.11.24. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 17.55. Печ. л. 17.0. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 149.

Цена свободная.

Signed to print 15.11.24. Sheet size 60×84 1/8.

Educational-ed. liter. 17.55. Printed sheets 17.0. Number of copies 300.

Printing plant 1–150 copies. Order no. 149.

Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia