

ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ



Темы номера:

- ✓ Применение алгоритма стаи серых волков для решения дискретных задач
- ✓ Методика измерения занятости радиочастотного спектра
- ✓ Исследование качества восприятия голографических копий

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

ТРУДЫ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Том 10. № 5

Proceedings of Telecommunication Universities

Vol. 10. Iss. 5

Санкт-Петербург

2024

Описание журнала

Научный журнал. Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (распоряжение Минобрнауки России № 21-р от 12.02.2019), по специальностям (распоряжение № 33-р от 01.02.2022):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 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
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Журнал позиционирует себя как научный, в связи с этим его целями являются ознакомление научной общественности (научного сообщества) с результатами оригинальных исследований, выполненных ведущими учеными и специалистами и их коллективами, а также апробация научных результатов, полученных при подготовке кандидатских и докторских диссертаций для повышения качества (уровня) проводимых исследований. Издание ставит перед собой задачу расширения инфокоммуникативного пространства взаимодействия российских и зарубежных ученых. Целевой аудиторией журнала являются ученые и специалисты-практики в области связи и телекоммуникаций и смежных направлениях науки и техники, а также профессорско-преподавательский состав и студенты, обучающиеся по программам аспирантуры, магистратуры, специалитета и бакалавриата профильных вузов и кафедр.

Выпускается с 1960 года. Выходит 6 раз в год. Издается на русском и английском языках.

Редакционный совет

Киричек Р.В. <i>Главный редактор</i>	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Владыко А.Г. <i>Зам. Главного редактора</i>	к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Буйневич М.В.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия
Зеневич А.О.	д.т.н., проф., Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Республика Беларусь
Розанов Н.Н.	д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия
Дукельский К.В.	д.т.н., доцент, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия
Кучерявый Е.	PhD, Технологический университет Тампере, г. Тампере, Финляндия
Каримов Б.Т.	к.т.н., доцент, Институт электроники и телекоммуникаций, Кыргызский государственный технический университет И. Раззакова (КГТУ), г. Бишкек, Кыргызстан
Тиамийу О.А.	PhD, Университет Илорина, г. Илорин, Нигерия
Козин И.Д.	д.ф.-м.н., проф., Алматинский университет энергетики и связи, г. Алма-Аты, Казахстан
Самуйлов К.Е.	д.т.н., проф., Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия
Степанов С.Н.	д.т.н., проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Россия
Росляков А.В.	д.т.н., проф., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара, Россия
Кучерявый А.Е.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Канаев А.К.	д.т.н., проф., Петербургский университет путей сообщения имени Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия
Новиков С.Н.	д.т.н., проф., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия
Дворников С.В.	д.т.н., проф., Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (ВАС), г. Санкт-Петербург, Россия
Коржик В.И.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Ковалгин Ю.А.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Description

Scientific journal. The journal is included in the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of science and for the degree of doctor of science should be published (order of the Ministry of Education and Science of Russia No 21-r of 12 February 2019) in the field of (order of the Ministry of Education and Science of Russia No 33-r of 01 February 2022):

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs

2.2.6. Optical and optoelectronic devices and complexes

2.2.13. Radio engineering, including television systems and devices

2.2.14. Antennas, microwave devices and its technologies

2.2.15. Systems, networks and telecommunication devices

2.2.16. Radiolocation and radio navigation

2.3.1. System analysis, management and information processing, statistics

2.3.6. Methods and systems of information security, cybersecurity

The journal positions itself as a scientific one, in this regard, its goals are to familiarize the scientific community (scientific community) with the results of original research carried out by leading scientists and specialists and their teams, as well as approbation of scientific results obtained in the preparation of candidate and doctoral dissertations to improve the quality (level) of ongoing research. The publication sets itself the task of expanding the infocommunicative space of interaction between Russian and foreign scientists. The target audience of the journal are scientists and practitioners in the field of communications & telecommunications and related fields of science & technology, as well as faculty and students enrolled in postgraduate, master's, specialisation and bachelor's programs of profiled universities and departments.

Since 1960. Published 6 times per year. Published in Russian and English.

Editorial Board

R.V. Kirichek DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University
Editor-in-chief of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

A.G. Vladiko PhD, associate prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University
Deputy editor-in-chief of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

M.V. Buinevich DSc, prof., Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Saint-Petersburg, Russia

A.O. Zenevich DSc, prof., Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus

N.N. Rozanov DSc, prof., member-corr. RAS, Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI),
Saint-Petersburg, Russia

K.V. Dukel'skii DSc, associate prof., Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI),
Saint-Petersburg, Russia

Y. Koucheryavy PhD, Tampere University of Technology, Tampere, Finland

B.T. Karimov PhD, Institute of Electronics and Telecommunications, Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

O.A. Tiarniyu PhD, University of Ilorin, Ilorin, Nigeria

I.D. Kozin DSc, prof., Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

K.E. Samuilov DSc, prof., Peoples' Friendship University (RUDN), Moscow, Russia

S.N. Stepanov DSc, prof., Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI),
Moscow, Russia

A.V. Roslyakov DSc, prof., Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara,
Russia

A.E. Koucheryavy DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT),
Saint-Petersburg, Russia

A.K. Kanaev DSc, prof., Emperor Alexander I-st Petersburg State Transport University (PSTU),
Saint-Petersburg, Russia

S.N. Novikov DSc, prof., Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS),
Novosibirsk, Russia

S.V. Dvornikov DSc, prof., Military Academy of Telecommunications named after Marshal Union S.M. Budyonny,
Saint-Petersburg, Russia

V.I. Korzhik DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT),
Saint-Petersburg, Russia

Yu.A. Kovalgin DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT),
Saint-Petersburg, Russia

РЕГИСТРАЦИОННАЯ ИНФОРМАЦИЯ / REGISTRATION INFORMATION

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: ПИ № 77-77501 от 17.01.2020 г. (пред. рег. № 77-17986 от 07.04.2004 г.)

Размещение в РИНЦ (elibrary.ru) по договору: № 59-02/2013R от 20.02.2013

Registered by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media on 17.01.2020: PI No. 77-77501 (prev. reg. on 04.07.2004: No. 77-17986)

Accommodation in RINC (elibrary.ru) by agreement on 20.02.2013: No. 59-02/2013R



Товарный знак № 929373.

Правообладатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 61, литера А

Trademark No. 929373.

Copyright holder:

Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications» (SPbSUT)

191186, St. Petersburg, emb. Moika River, 61, letter A

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / CONTACT INFORMATION

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес учредителя: 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2

Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970

E-mail: tuzs@sut.ru

Web: <http://tuzs.sut.ru>

ВК: <http://vk.com/spbtuzs>

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**, <https://show.ibc.org>

Publisher: Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications» (SPbSUT)

Publisher address: 191186, Saint Petersburg, Moika river embankment, 61-A

Post address: 193232, Saint Petersburg, Prospekt Bolshevikov, 22/1

Phone: +7 (812) 326-31-63, local 2022, +79643759970

E-mail: tuzs@sut.ru

Web: <http://tuzs.sut.ru>

Executive Editor **Tatarnikova I.M.**

Commissioning Editor **Yashugin D.N.**

Design: **Korovin V.M.**, <https://show.ibc.org>

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ / IMPRINT

Дата выхода в свет: 11.11.2024
Тираж: 1000 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Release date: 11.11.2024
Circulation: 1000 copies. Free price.

Printed in the printing office

Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications»



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Демидов Н.А., Маколкина М.А. Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий	7	Demidov N.A., Makolkina M.A. Holographic communication: a study of the quality of holographic copies perception
Жданова И.М., Дворников С.С., Дворников С.В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований	14	Zhdanova I.M., Dvornikov S.S., Dvornikov S.V. Detection of traffic anomalies based on processing their frame wavelet transformations
Невежин В.Н., Комнатнов М.Е. Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах	24	Nevezhin V.N., Komnatnov M.E. Evaluation the influence of thin film of water on the frequency dependences of transmission line S-parameters at positive and negative temperatures
Помогалова А.В. Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи	34	Pomogalova A.V. The efficiency assessment of the blockchain networks adaptive algorithm as part of a multi-consensus system on communication networks
Токарев А.Б., Останков А.В., Полев В.Ю. Методика измерения занятости радиочастотного спектра, изменяющейся в соответствии с суточным циклом	43	Tokarev A.B., Ostankov A.V., Polev V.Yu The method of measuring the occupancy of the radio frequency spectrum, varying according to the daily cycle
Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности	50	Fokin G.A. A Set of models for device positioning in sixth generation networks. Part 2. Review of algorithms and accuracy assessment

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Лисов А.А., Возмилов А.Г., Гундарев К.А., Кулганатов А.З. Применение алгоритма стаи серых волков и нейронных сетей для решения дискретных задач	80	Lisov A.A., Vozmilov A.G., Gundarev K.A., Kulganatov A.Z. Application of the gray wolf optimization algorithm and neural networks for solving discrete problems
---	-----------	---

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Авсентьев О.С., Бутов В.В., Вальде А.Г. Модели обоснования организационно-технического обеспечения мероприятий по созданию СЗИ объектов информатизации	93	Avsentyev O.S., Butov V.V., Valde A.G. Justification models of organizational and technical support of measures to create information protection system of informatization objects
Беляев П.Ю., Зикратов И.А. Исследование автономной навигации беспилотных летательных аппаратов на основе корреляционных методов сравнения изображений	109	Belyaev P.Yu., Zikratov I.A. Research on autonomous navigation of unmanned aerial vehicles based on correlation-based image comparison methods
Израилов К.Е. Исследование распределения константных значений в исходном коде программ на языке C	119	Izrailov K.E. Constant values distributions investigation in the C programs source code

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

**2.2.6 – Оптические
и оптико–электронные приборы
и комплексы**

**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

Научная статья

УДК 621.397

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-7-13>

Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий

✉ Николай Александрович Демидов, deminickal@outlook.com✉ Мария Александровна Маколкина, makolkina@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность. Голография становится одним из наиболее перспективных направлений визуализации трехмерных объектов, что обосновывает появление определенного научного интереса к этой области исследований. Прослеживается общая глобальная тенденция активизации работы специалистов над проблемой использования голографических технологий в различных областях деятельности человека. Тенденции внедрения голографических услуг и голографического типа коммуникации уже сегодня требуют пересмотра принципов планирования, проектирования и построения существующих сетей связи, а также подходов к реализации сетей шестого поколения (6G), в основе которых лежит интеграция разнообразных технологий и сетей связи в единую сеть. Отдельным вопросом стоит оценка качества обслуживания и качества восприятия голографических услуг как объективными, так и субъективными методами. Практически отсутствуют критерии оценки качества голографического изображения, в том числе шкалы и методы субъективной оценки качества предоставления голографических услуг. Более того, свойства голографического потока достаточно мало изучены, а тем более его влияние на сети связи и требования к параметрам сетей, что делает задачи исследования характеристик трафика и оценки качества обслуживания голографических услуг весьма актуальными.

Целью работы является оценка качества восприятия голографической конференцсвязи с помощью субъективного метода оценки на модельной сети. В работе использованы **методы** субъективной оценки качества восприятия. Представленные в статье материалы отражают результаты экспериментально-исследовательской работы авторов по изучению проблемы качества восприятия голографических копий. Дано описание разработанной схемы натурного эксперимента.

Результаты. Представлены данные, полученные в результате работы экспертной группы по оценке качества восприятия. Субъективная оценка качества восприятия голографического изображения начинает ухудшаться при наличии 8 соединений и становится неудовлетворительной при 12 соединениях, что необходимо учитывать при планировании экспериментальных исследований работ по оценке качества восприятия.

Новизна. Впервые была проведена оценка качества восприятия предоставления услуги голографической конференцсвязи субъективным методом оценки.

Теоретическая значимость. Проанализировано влияние увеличения числа потоков голографического трафика на качество восприятия получаемого контента.

Практическая значимость. Расширение возможностей оценки степени удовлетворенности пользователей голографическими услугами.

Ключевые слова: голографическая коммуникация, голографический трафик, голографические технологии, качество восприятия, сети связи

Ссылка для цитирования: Демидов Н.А., Маколкина М.А. Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 7–13. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-7-13. EDN:RCSNZL

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-7-13>

Holographic Communication: A Study of the Quality of Holographic Copies Perception

✉ Nikolay A. Demidov ✉, deminickal@outlook.com

✉ Maria A. Makolkina, makolkina@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. Holography is becoming one of the most promising areas of visualization of three-dimensional objects, which justifies the emergence of a certain scientific interest in this area of research. There is a general global trend of intensifying the work of specialists on the problem of using holographic technologies in various areas of human activity. Trends in the implementation of holographic services and holographic communication today already require a revision of the principles of planning, designing and building existing communication networks, as well as approaches to the implementation of sixth-generation networks 6G, which are based on the integration of various technologies and communication networks into a single network. A separate issue is the assessment of the quality of service and the quality of perception of holographic services by both objective and subjective assessment methods. There are practically no criteria for assessing the quality of a holographic image, including scales and methods for subjective assessment of the quality of holographic services. Moreover, the properties of the holographic flow are poorly understood, and even less so its influence on communication networks and requirements for network parameters, which makes the tasks of studying traffic characteristics and assessing the quality of service of holographic services very relevant.

The aim of the work is to evaluate the quality of perception of holographic conference calls using a subjective evaluation method on a model network. The work uses **methods** of subjective assessment of the quality of perception. The materials presented in the article reflect the results of the authors' experimental research work on studying the problem of the quality of perception of holographic copies. A description of the developed scheme of a full-scale experiment is given.

Results. The data obtained as a result of the work of an expert group on assessing the quality of perception are presented. The subjective assessment of the quality of perception of a holographic image begins to deteriorate with 8 connections and becomes unsatisfactory with 12 connections, which must be taken into account when planning experimental studies of work on assessing the quality of perception.

Novelty. For the first time, an assessment of the quality of perception of the provision of a holographic conferencing service was carried out using a subjective assessment method.

Theoretical significance. The influence of increasing the number of holographic traffic flows on the quality of perception of the received content is analyzed.

Practical significance. Expanding the possibilities for assessing the degree of user satisfaction with holographic services.

Keywords: holographic communication, holographic traffic, holographic technologies, quality of experience, communication networks

For citation: Demidov N.A., Makolkina M.A. Holographic Communication: A Study of the Quality of Holographic Copies Perception. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):7–13. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-7-13. EDN:RCSNZL

Введение

Внедрение инновационных технологий, в первую очередь, способствует реализации основной цели – улучшению качества жизни населения.

Повышение качества и эффективности работы в сфере медицинского обслуживания, педагогической деятельности на каждом уровне системы образования, организации работы производственных комплексов, во многом зависит от эффективной

организации информационно-коммуникационной деятельности и качества обслуживания в сетях связи. Инновационный подход может быть реализован посредством развития голографического типа коммуникации.

Голография становится одним из наиболее перспективных направлений визуализации трехмерных объектов, что обосновывает появление определенного научного интереса к этой области исследований. Прослеживается общая глобальная тенденция активизации работы специалистов над проблемой использования голографических технологий в различных областях деятельности человека.

Российский разработчик систем видеоконференций представил комплекс оборудования HoloLive, позволяющий организовать 3D-видеозвонок для проведения голографической конференции (<https://www.tadviser.ru>).

В статье [1] рассматривается один из основных технологических элементов для эффективного включения многопользовательских систем голоконференций.

Исследования [2, 3] доказывают реальное повышение качества учебного процесса с использованием голографической видеоконференции.

Авторы в [4] утверждают, что основанная на голографии видеоконференция может сохранять полное трехмерное качество объекта, и помогает зрителям воспринимать его как настоящее трехмерное изображение. В частности подчеркивается, что голографическая видеоконференция может использоваться в нескольких аудиториях одновременно, независимо от места их нахождения и позволяет делиться опытом с более широкой аудиторией без каких-либо ограничений по времени и расстоянию.

В работе [6] обсуждаются потенциальные преимущества многосторонней голографической коммуникации и показаны ключевые проблемы, которые необходимо решить для реализации потенциала голоконференций. Возрастает количество исследований [2, 6], в которых дан анализ практического применения голоконференций, подтверждающие положительный результат внедрения. В работе [7] предложено описание разработанного и интегрированного сервиса для обеспечения многопользовательских услуг голопортации в реальном времени.

Авторы [8] утверждают, что видеоконференции могут быть менее личными, чем встреча лицом к лицу, можно упустить важный язык тела (когда перед глазами пиксельное изображение). Руководители предпочитают реализацию удаленной голографической связи в форме голоконференций для достижения гуманизации виртуального удаленного контакта, стимулирование командной работы. Авторы подчеркивают, что голографиче-

ские конференции способны заменить реализованные типы систем связи на инновационные. На полученных результатах [9] обосновывается предположение, что эмоциональное осознание взгляда партнера при голоконференции – способность отслеживать его направление, становится даже более важным, чем простой зрительный контакт при видеоконференции.

Универсальность инновационного эффекта голоконференции подтверждается реализацией многочисленных проектов. Авторы-разработчики предложили новую систему для проведения голографических конференций – HoloKinect [10]. Компании Polycom, Cisco, Google демонстрируют реализованные проекты телеприсутствия. На конференции Google I/O 2021 была представлена в режиме реального времени сверхреалистичная голографическая копия собеседника (<https://io.google/2021/?lng=en>). Прототип системы голографической конференцсвязи с эффектом присутствия был представлен на выставке Integrated Systems Europe 2023 компанией Logitech, которая проходила в Барселоне, еще один был установлен в офисе Steelcase в Мичигане (<https://www.iseurope.org/welcome>). Следующий пример реализации голографической конференцсвязи был представлен на выставке CES 2024 в Лас-Вегасе. Это устройство называется Holobox, оно позволяет общаться с полноразмерной голографической проекцией человека (<https://www.ces.tech/discover/?type=Article&q=Holo>).

Потенциально, более широкое использование голографического типа коммуникации повышает значение решения проблемы качества голографического изображения. В [11] отмечено, что в дополнение к имеющейся метрике «качество обслуживания» (QoS, аббр. от англ. Quality of Service) добавилась еще одна – качество восприятия (QoE, аббр. от англ. Quality of Experience), определяющая субъективную оценку пользователем.

Авторы в [12] отмечают, что с появлением 3D-технологий одной из проблем, с которыми сталкивается индустрия, является оценка качества 3D-контента и оценка качества впечатлений зрителя (QoE). В работе акцентируется внимание на том, что если для 2D-контента определены основные факторы, влияющие на качество восприятия (яркость, контрастность и резкость), то в случае 3D восприятие глубины меняет влияние вышеупомянутых факторов на общее воспринимаемое качество 3D-видео. Исследователи определяют среди основных факторов качества 3D следующие: «количество глубины» и «визуальный комфорт» [13].

Анализ публикаций показал, что передача голографических копий недостаточно изучена. На данный момент можно констатировать, что исследо-

вание проблемы в рамках изучения взаимовлияния нагрузки и качества не проводилось.

Постановка задачи

Цель исследования: изучение QoE голографических копий, полученных в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени.

Для достижения цели исследования сформулированы следующие задачи:

- определить базисные шаги для разработки программы проведения стендовых испытаний;
- изучить технические характеристики оборудования для эксперимента;
- разработать / выбрать необходимую многоуровневую систему критериев для оценки QoE голографических копий;
- провести оценку влияния нагрузки на QoE контента, полученного в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени;
- дать анализ полученных показателей, обобщить материал и сделать выводы.

Для проведения прикладной части диссертационного исследования «Разработка и исследование моделей трафика и подходов для оценки качества

обслуживания голографических копий» местом испытаний определена лаборатория MEGANETLAB6G кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

На этапе сбора и анализа данных было сделано предположение о необходимости изучения QoE при увеличении количества источников голографического трафика [14].

Натурный эксперимент для исследования качества восприятия голографических копий, полученных в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени, был проведен на модельной сети лабораторного стенда. Участниками данного исследования были сотрудники лаборатории, имеющие соответствующие прикладные компетенции для проведения стендовых испытаний. Использовалось оборудование лаборатории: 3D-камеры Microsoft Kinect, которые в реальном времени записывают движущийся объект, передавая глубину, и обеспечивают визуальный комфорт восприятия голографического изображения, проекционный экран для воспроизведения объемного изображения, два сервера, два коммутатора D-Link (SW#1, SW#2). Между коммутаторами, серверами средой передачи данных был выбран UTP кабель cat.5e. Схема натурного эксперимента представлена на рисунке 1.

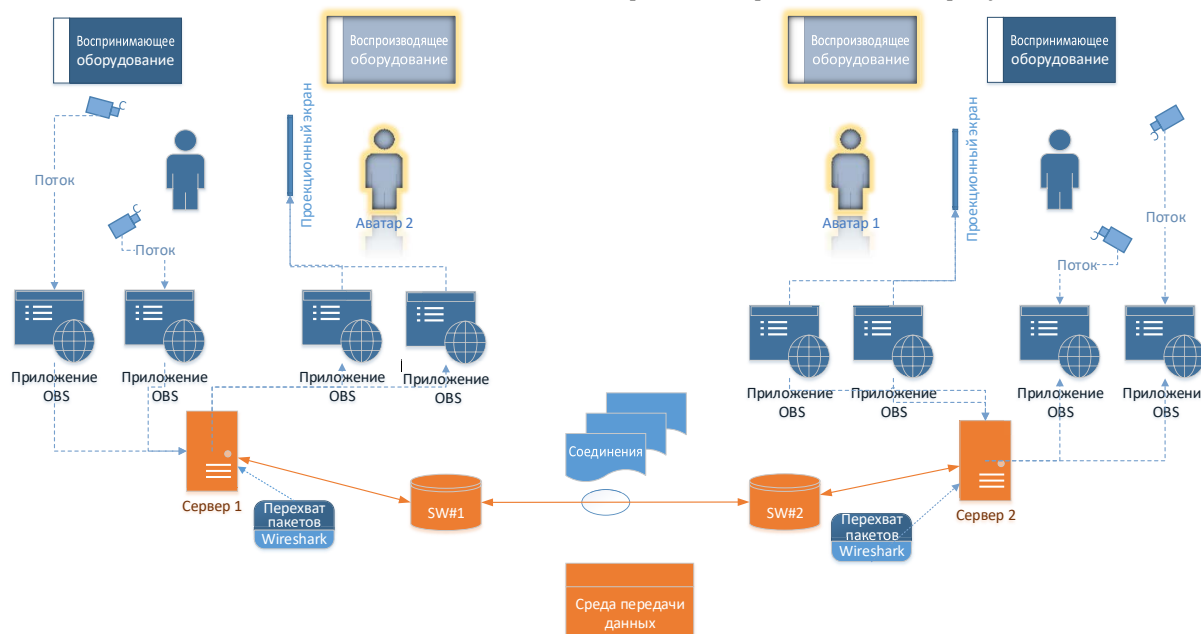


Рис. 1. Схема (структура) стенда для натурного эксперимента

Fig. 1. Scheme (Structure) of the Stand for a Natural Experiment

Голографический тип коммуникации был реализован посредством двух сенсорных RGB-D камер Microsoft Kinect на одной и второй стороне голографического телемоста для передачи аватаров каждому пользователю. Полученный поток был сформирован с помощью специального инструмента – OBS Studio (<https://obsproject.com>). Для

перехвата и анализа сетевого трафика применялась программа Wireshark (<https://www.wireshark.org>). Последовательно увеличивая количество соединений, и, соответственно, число потоков голографического трафика, провели наблюдения за изменением качества получаемого контента.

Для организации голографической конференц-связи необходимо два оконечных терминала, на каждый из которых приходит 1 голографический поток, и в обратную сторону идет также 1 голографический поток. Таким образом в одном соединении передается 4 голографических потока.

Последовательно увеличивая количество соединений, отслеживалось изменение параметров сети и характеристики потоков и производилась субъективная оценка качества передаваемого голографического потока. Для моделирования последовательного увеличения количества соединений последние создавались на одном и том же оборудовании. Так как проводили экспериментальное исследование по созданию параллельных телемостов, придерживались параметров прогнозируемого самого узкого места – 1 гбит/с на выгрузку и 1 гбит/с на загрузку по стандарту 5G.

Как утверждают авторы [15], оценка QoE изображения может быть проведена как объективными методами, так и субъективными. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Объективную оценку проводят с помощью программных и аппаратных средств. Субъективная или экспертная оценка проводится, как правило, с группой лиц для качественной / количественной оценки свойств объекта.

В данном исследовании во время эксперимента фиксировали субъективную оценку QoE каждого эксперта по предложенным критериям. Группа экспертов оценивала QoE голографического изображения по таким показателям как: эффект глубины, естественность изображения, визуальный комфорт, целостность, плавность движения. При каждом увеличении количества соединений снимали показатели и проводили оценку QoE. Было проведено более 20 экспериментов с вариацией времени наблюдения от 60 до 80 с.

Вычисление средней оценки R для каждой демонстрации определялось по выражению:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N r_i, \quad (1)$$

где r_i – оценка качества от i -го пользователя; N – количество пользователей.

Измеряя показатели, используя Wireshark, в результате получили статистические данные, которые позволили определить основные характеристики агрегированного потока и построить графики ввода / вывода Wireshark для 1, для 5 и для 14 соединений (рисунок 2).

Выполняя задачу исследования – провести оценку влияния нагрузки на QoE контента, полученного в результате передачи голографического трафика в режиме реального времени, установили

количество соединений, являющиеся граничным уровнем, после которого QoE изображения значительно ухудшается. Результаты эксперимента представлены таблице 1. Наивысший балл (5) определялся, когда голографический контент по всем параметрам соответствовал оригиналу. Если количество соединений приближалось к 10 и 11, наблюдалось ухудшение QoE голографических аватаров. Экспертная группа оценивала голографический контент в 5 баллов по пятибалльной системе вплоть до 8–9 соединений. Резкое снижение качества восприятия было зафиксировано при 12–13 соединениях – эксперты показали оценку в 3 балла. Гипотеза о зависимости QoE от количества соединений была подтверждена экспериментально. Получены данные о предельном количестве соединений, сохраняющем высокую оценку QoE пользователями. На рисунке 3 отображена зависимость QoE от количества соединений.

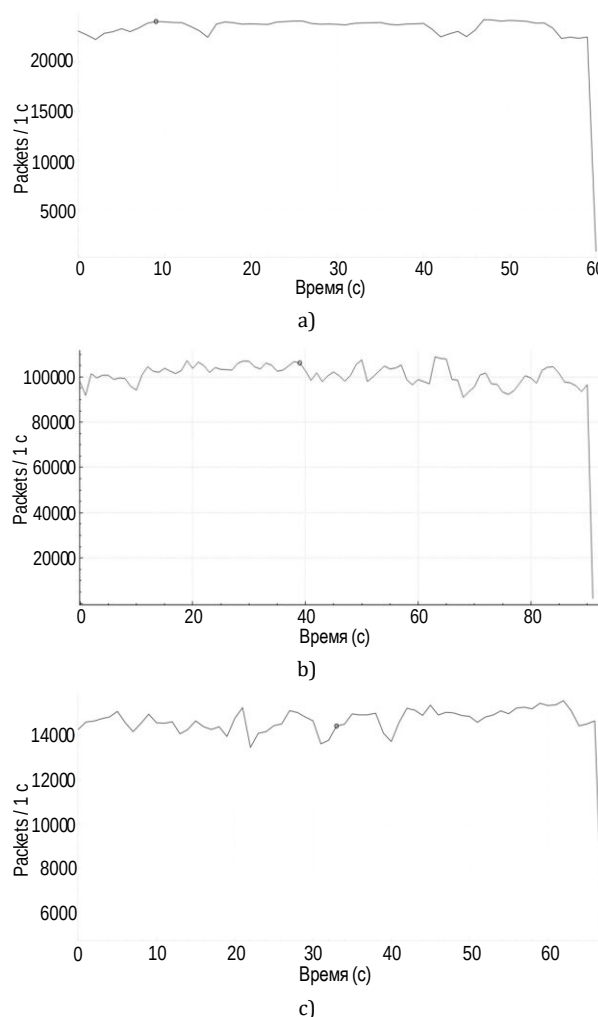


Рис. 2. Интенсивность передачи пакетов для 1 (а), 5 (б) и 14 (с) соединений в течение сеанса наблюдений

Fig. 2. Packet Transmission Intensity for 1 (a), 5 (b) and 14 (c) Connections during the Observation Session

ТАБЛИЦА 1. Статистические результаты эксперимента

TABLE 1. Statistical Results of the Experiment

Количество соединений	Число потоков	Пакетов/с	Мбит/с	Оценка QoE
1	4	24000	282,62	5
3	12	72000	847,87	5
5	20	110000	1295,36	5
8	32	145000	1472,00	5
11	44	142000	1648,64	4
12	48	145000	1672,19	3
13	52	125000	1707,52	3
14	56	140000	1707,52	2
15	60	150000	1736,96	1
19	76	147500	1766,40	1

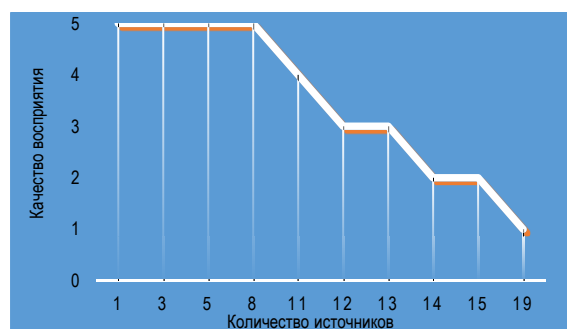


Рис. 3. График зависимости оценок QoE от количества соединений

Fig. 3. Graph of Dependence of Perception Ratings on the Number of Connections

Заключение

На основе разработанной схемы стенда был проведен натурный эксперимент, в результате которого группой экспертов были определены показатели QoE при возрастании нагрузки на сеть в зависимости от увеличения количества соединений. Опираясь на результаты экспериментального исследования, в дальнейшем могут быть сформулированы требования к необходимым характеристикам сетей связи для передачи качественного контента.

Интерпретация и обобщение полученных результатов позволила прийти к следующим выводам: снижение нагрузки в рамках организации соединений путем сжатия передаваемых данных, требует найти / установить / соблюдать баланс между поддержкой необходимого уровня качества предоставления услуги и возникающей нагрузки, требующей выделения ресурсов сети. Для достижения высокого качества голографического контента количество соединений не должно превышать десяти.

Данное исследование позволит прогнозировать дальнейшие направления исследований и планировать постановку научно-исследовательских задач в сфере развития голографического типа коммуникаций.

Список источников

- Cernigliaro G., Ansari A., Martos M., Montagud M., Fernandez S. Extended Reality Multipoint Control Unit – XR-MCU Enabling Multi-user Holo-conferencing via Distributed Processing. 2020. URL: <https://www.ibt.org/technical-papers/extended-reality-multipoint-control-unit-xr-mcu-enabling-multi-user-holoconferencing-via-distributed-processing/6620.article> (Accessed 23.10.2024)
- Li N., Lefevre D. Holographic teaching presence: participant experiences of interactive synchronous seminars delivered via holographic videoconferencing // Research in Learning Technology. 2020. Vol. 28. DOI:10.25304/rlt.v28.2265
- Themelis C., Sime J.A. From Video-Conferencing to Holoportation and Haptics: How Emerging Technologies Can Enhance Presence in Online Education? // Emerging Technologies and Pedagogies in the Curriculum. Bridging Human and Machine: Future Education with Intelligence. Singapore: Springer, 2020. PP. 261–276. DOI:10.1007/978-981-15-0618-5_16
- Aman A.M., Shiratuddin N. Holographic Video Conferencing for Fostering Communication and Participation: Pre-Conceptualization of Focus Group of Female Learners in Arab Open University (KSA) // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7. Iss. 4.29. PP. 157–162.
- Montagud M., Cernigliaro G., Arevalillo-Herráez M., García-Pineda M., Segura-García J., Fernández S. Social VR and multi-party holographic communications: Opportunities, Challenges and Impact in the Education and Training Sectors // arXiv:2210.00330. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2210.00330
- Mohamad H., Montagud M., Rincón D. Multiuser Virtual Experiences powered by Holoportation Technologies and Multimodal Human-Computer Interaction (HCI) // Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference (MMSys, Bari, Italy, 15–18 April 2024). New York: ACM, 2024. PP. 536–540. DOI:10.1145/3625468.365291
- Fernández S., Montagud M., Rincón D., Moragues J., Cernigliaro G. Addressing Scalability for Real-time Multiuser Holoportation: Introducing and Assessing a Multipoint Control Unit (MCU) for Volumetric Video // Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia (MM, Ottawa, Canada, 29 October – 3 November 2023). New York: ACM, 2023. PP. 9243–9251. DOI:10.1145/3581783.3613777
- Luevano L., de Lara E. L., Quintero H. Professor Avatar Holographic Telepresence Model // Kumar M. (ed.) Holographic Materials and Applications. 2019. DOI:10.5772/intechopen.85528
- Ishii H., Kobayashi M., Grudin J. Integration of interpersonal space and shared workspace: ClearBoard design and experiments // ACM Transactions on Information Systems. 1993. Vol. 11. Iss. 4. PP. 349–375. DOI:10.1145/159764.15976
- Siemonsma S., Bell T. Holokinect: Holographic 3D Video Conferencing // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 21. P. 8118. DOI:10.3390/s22218118
- Парамонов А.И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования. Дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 2014. 325 с. EDN:ZPNATH
- Banitalebi-Dehkordi A., Pourazad M.T., Nasiopoulos P. An efficient human visual system based quality metric for 3D video // Multimedia Tools and Applications. 2016. Vol. 75. PP. 4187–4215. DOI:10.1007/s11042-015-2466-z

13. Chen W., Fournier J., Barkowsky M., Le Callet P. Quality of experience model for 3DTV // *Proceedings of the XIIIth SPIE Conference on Stereoscopic Displays and Applications* (Burlingame, United States, 22–26 January 2012). SPIE, 2012. Vol. 8288. DOI:10.1117/12.907873
14. Демидов Н. А. Исследование трафика 3D-видеопотока на имитационной модели // *Электросвязь*. 2024. № 3. С. 44–48. DOI:10.34832/ELSV.2024.52.3.008. EDN:DNQCWX
15. Гоголь А.А., Туманова Е.И. Эволюция телевизионных систем в контексте оценки качества видеоизображений // *Труды учебных заведений связи*. 2018. Т. 4. № 1. С. 32–39. EDN:YUZUNM

References

1. Cernigliaro G., Ansari A., Martos M., Montagud M., Fernandez S. *Extended Reality Multipoint Control Unit – XR-MCU Enabling Multi-user Holo-conferencing via Distributed Processing*. 2020. URL: <https://www.abc.org/technical-papers/extended-reality-multipoint-control-unit-xr-mcu-enabling-multi-user-holoconferencing-via-distributed-processing/6620.article> [Accessed 23.10.2024]
2. Li N., Lefevre D. Holographic teaching presence: participant experiences of interactive synchronous seminars delivered via holographic videoconferencing. *Research in Learning Technology*. 2020;28. DOI:10.25304/rlt.v28.2265
3. Themelis C., Sime J.A. From Video-Conferencing to Holoportation and Haptics: How Emerging Technologies Can Enhance Presence in Online Education? In: *Emerging Technologies and Pedagogies in the Curriculum. Bridging Human and Machine: Future Education with Intelligence*. Singapore: Springer; 2020. p.261–276. DOI:10.1007/978-981-15-0618-5_16
4. Aman A.M., Shiratuddin N. Holographic Video Conferencing for Fostering Communication and Participation: Pre-Conceptualization of Focus Group of Female Learners in Arab Open University (KSA). *International Journal of Engineering & Technology*. 2018;7(4.29):157–162.
5. Montagud M., Cernigliaro G., Arevalillo-Herráez M., García-Pineda M., Segura-García J., Fernández S. Social VR and multi-party holographic communications: Opportunities, Challenges and Impact in the Education and Training Sectors. *arXiv:2210.00330*. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2210.00330
6. Mohamad H., Montagud M., Rincón D. Multiuser Virtual Experiences powered by Holoportation Technologies and Multimodal Human-Computer Interaction (HCI). *Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys, 15–18 April 2024, Bari, Italy*. New York: ACM; 2024. p.536–540. DOI:10.1145/3625468.365291
7. Fernández S., Montagud M., Rincón D., Moragues J., Cernigliaro G. Addressing Scalability for Real-time Multiuser Holoportation: Introducing and Assessing a Multipoint Control Unit (MCU) for Volumetric Video. *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia, MM, 29 October – 3 November 2023, Ottawa, Canada*. New York: ACM; 2023. p.9243–9251. DOI:10.1145/3581783.3613777
8. Luevano L., de Lara E. L., Quintero H. Professor Avatar Holographic Telepresence Model. In: *Kumar M. (ed.) Holographic Materials and Applications*. 2019. DOI:10.5772/intechopen.85528
9. Ishii H., Kobayashi M., Grudin J. Integration of interpersonal space and shared workspace: ClearBoard design and experiments. *ACM Transactions on Information Systems*. 1993;11(4):349–375. DOI:10.1145/159764.15976
10. Siemonsma S., Bell T. Holokinect: Holographic 3D Video Conferencing. *Sensors*. 2022;22(21):8118. DOI:10.3390/s22218118
11. Paramonov A.I. *Development and Research of a Complex of Traffic Models for Public Communication Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2014. 325 p. (in Russ.) EDN:ZPNATH
12. Banitalebi-Dehkordi A., Pourazad M.T., Nasiopoulos P. An efficient human visual system based quality metric for 3D video. *Multimedia Tools and Applications*. 2016;75:4187–4215. DOI:10.1007/s11042-015-2466-z
13. Chen W., Fournier J., Barkowsky M., Le Callet P. Quality of experience model for 3DTV. *Proceedings of the XIIIth SPIE Conference on Stereoscopic Displays and Applications, 22–26 January 2012, Burlingame, United States, vol.8288*. SPIE; 2012. DOI:10.1117/12.907873
14. Demidov N.A. Investigation of 3D video stream traffic on a simulation model. *Electrosvyaz*. 2024;3:44–48. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.52.3.008. EDN:DNQCWX
15. Gogol A., Tumanova E. The Evolution of Television Systems in the Context of Video Quality Estimation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(1):32–39. (in Russ.) EDN:YUZUNM

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; одобрена после рецензирования 03.10.2024; принята к публикации 07.10.2024.

The article was submitted 09.07.2024; approved after reviewing 03.10.2024; accepted for publication 07.10.2024.

Информация об авторах:

ДЕМИДОВ
Николай Александрович

преподаватель Санкт-Петербургского колледжа телекоммуникаций
им. Э.Т. Кренкеля
 <https://orcid.org/0000-0001-7070-3121>

МАКОЛКИНА
Мария Александровна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-4251-2691>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.396

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23>

Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований

Инна Михайловна Жданова¹✉, inna_zhdan@icloud.com

Сергей Сергеевич Дворников^{1,2}, dvornik.92@mail.ru

Сергей Викторович Дворников^{1,2}, practicdsv@yandex.ru

¹Военная академия связи им. С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Активный переход к массовой цифровой инфраструктуре, основанной на технологии интернета вещей (IoT), вывел телекоммуникационные сети на уровень доминирующих информационных ресурсов. Одновременное увеличение количества существующих интернет-сервисов неразрывно связано с ростом разнообразия сетевых аномалий на телекоммуникационное оборудование. В свою очередь, существующие методы обнаружения сетевых угроз не позволяют своевременно оценить сетевой трафик, который характеризуется большим количеством параметров, а выявляемые аномалии от внешнего вторжения не имеют явно выраженных закономерностей. **Целью (исследования)** является повышение эффективности обнаружения аномалий трафика по результатам обработки его фреймового вейвлет-преобразования. Научная задача состоит в разработке научно-методических подходов, позволяющих эффективно проводить анализ и своевременное обнаружение аномалий в сетевом трафике. В интересах исследования был проведен сравнительный обзор **методов** поиска обнаружения аномалий сетевого трафика, а также применены алгоритмы обнаружения неконтролируемых аномалий, методы анализа трафика на основе локального коэффициента выброса, бинарных деревьев, оптической эмиссионной спектроскопии.

Решение. Рассматриваются результаты исследования возможности обнаружения аномалий в трафике битового потока по результатам его кратномасштабного преобразования в базисе вейвлета Хаара. Обоснован выбор для дальнейшей обработки коэффициентов матрицы декомпозиции трафика вдоль переменной временного сдвига. Доказано, что кратномасштабные преобразования не только повышают структурные различия трафиков, но и открывают возможность локализации аномалий, вызвавшие указанные различия. **Научная новизна** работы определяется авторским подходом к обнаружению аномалий сетевого трафика при переходе от непосредственного представления сигнала в виде его дискретных отсчетов к коэффициентам, сформированным из матриц его вейвлет-преобразований, и, как результат, повышения его контрастности по отношению к другим сигналам с близкой структурой.

Теоретическая значимость. Доказана необходимость и достаточность использования вейвлет-коэффициентов вместо временных отсчетов сигналов в базисе материнского вейвлета из матрицы формируемого фрейма. Установлена взаимосвязь между показателями Херста и коэффициентами функций взаимной корреляции.

Практическая значимость. Полученные в работе результаты в перспективе могут быть использованы при построении моделей оценки сетевого трафика в условиях преднамеренных воздействий, а также методик поиска и синтеза эффективных методов защиты от них.

Ключевые слова: аномалии трафика, обнаружение аномалий битового потока, статистические параметры трафика, локализация положения аномалий в структуре трафика

Ссылка для цитирования: Жданова И.М., Дворников С.С., Дворников С.В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 14–23. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. EDN:BJFZSE

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23>

Detection of Traffic Anomalies Based on Their Frame Wavelet Transformations Processing

 Inna M. Zhdanova¹✉, inna_zhdan@icloud.com

 Sergey S. Dvornikov^{1,2}, dvornik.92@mail.ru

 Sergey V. Dvornikov^{1,2}, practicdsv@yandex.ru

¹Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Annotation

Relevance. The active transition to a massive digital infrastructure based on Internet of Things (IoT) technology has brought telecommunications networks to the level of dominant information resources. The one-time increase in the number of existing Internet services is inextricably linked to the growing variety of network anomalies on telecommunications equipment. In turn, existing methods of detecting network threats do not allow timely assessment of network traffic, which is characterized by a large number of parameters, and the detected anomalies from external interference do not have pronounced patterns.

The purpose of the study is to increase the efficiency of detecting traffic anomalies based on the results of processing its frame wavelet transform. The scientific task is to develop scientific and methodological approaches that allow effective analysis and timely detection of anomalies in network traffic. A comparative review of search **methods** for detecting network traffic anomalies, algorithms for detecting uncontrolled anomalies, traffic analysis methods based on local emission factor, binary trees, optical emission spectroscopy.

Decision. The results of the study of the possibility of detecting anomalies in the bitstream traffic based on the results of its multiple-variable transformation in the Haar wavelet basis are considered. The choice for further processing of the coefficients of the traffic decomposition matrix along the time shift variable is justified. It is proved that multiple-scale transformations not only increase the structural differences in traffic, but also open up the possibility of localization of anomalies that caused these differences.

The scientific novelty of the work is determined by the author's approach to detecting network traffic anomalies during the transition from the direct representation of a signal in the form of its discrete samples to coefficients formed from the matrices of its wavelet transformations, and, as a result, increasing its contrast with other signals with a similar structure.

Theoretical significance. The necessity and sufficiency of using wavelet coefficients instead of time samples of signals in the basis of the parent wavelet from the matrix of the generated frame is proved. The relationship between the Hurst indicators and the coefficients of the cross-correlation functions has been established.

Practical significance. The results obtained in the work, in the future, can be used in the construction of models for evaluating network traffic in conditions of deliberate, as well as methods for searching and synthesizing effective methods of protection against them.

Keywords: traffic anomalies, detection of bit stream anomalies, statistical traffic parameters, localization of the position of anomalies in the traffic structure

For citation: Zhdanova I.M., Dvornikov S.S., Dvornikov S.V. Detection of Traffic Anomalies Based on Their Frame Wavelet Transformations Processing. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):14–23. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. EDN:BJFZSE

Введение

Развитие цифровых технологий привело к существенному возрастанию объема передаваемой информации в сетях передачи данных [1]. А с учетом активного перехода к массовой инфраструктуре, основанной на технологии интернета вещей (IoT, *от англ.* Internet of Things), телекоммуникационные сети становятся доминирующим информационным ресурсом, оказывающим значительное влияние на общество и экономику любого современного государства [2, 3].

В свою очередь, развитие интернет-сервисов привело к росту разнообразия сетевых аномалий, обусловленных не только низким качеством сетевых услуг, но различными видами вредоносных атак [4]. Все это не только негативно сказывается на работе веб-сервисов, но и вызывает экономические потери, а также приводит к социальным потрясениям. Таким образом, аномалии выступают в качестве своеобразного индикатора, характеризующего состояние не только информационного трафика, но и телекоммуникационной сети в целом. Согласно [5], под аномалией понимается любое отклонение статистических показателей трафика от номинально установленных значений.

В качестве основных причин возникновения аномалий, как правило, выступают или технологический сбой работы оборудования, или злонамеренное вторжение в виде DDoS-атаки [5–7]. При этом следует понимать, что сам по себе факт наличия аномалии нельзя рассматривать в качестве гарантированного признака несанкционированного воздействия. Однозначное заключение можно сделать только по результатам анализа аномалий.

На основании указанного следует заключить, что поиск научно-методических подходов, обеспечивающих эффективное проведение анализа трафика, является актуальной задачей в области информационной безопасности, обеспечивающей своевременное обнаружение причин, приводящих к возникновению аномалий трафика.

Анализ подходов к выявлению аномалий

В настоящее время проблема обнаружения аномалий, как тема исследования, рассматривалась в различных научных областях знаний, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [1–8]. В частности, в [4] представлен анализ подходов обнаружения аномалий в сетевом трафике. По результатам указанного анализа авторами сделан обоснованный вывод об объективных сложностях получения однозначных закономерностей аномалий с несанкционированным вторжением.

Прежде всего, это связано с тем, что сетевой трафик характеризуется большим количеством параметров, а выявляемые аномалии, обусловленные

внешним вторжением, не имеют явно выраженных закономерностей в их структуре [4, 5, 9]. Однако, аномалия является причиной угроз служебному трафику.

Вместе с тем не все подходы, используемые при анализе трафика, в равной мере применимы для выявления аномалий [4, 8]. А поскольку разработка новых подходов требует проведения их сравнительного анализа, то целесообразно из арсенала существующих способов отобрать те из них, которые позволяют непосредственно обрабатывать битовые потоки.

Простейший способ обнаружения аномалий основан на расчете статистических параметров трафика [10, 11], к которым относят используемые в описательной статистике для характеристики данных следующие статистические меры (показатели): местоположение; разброс местоположения; форма.

В свою очередь, мера местоположения определяется средним значением, математическим ожиданием, значением медианы и величиной моды.

Среднее значение трафика $f(x)$ на интервале от $a = x_1$ до $b = x_2$ определяется как:

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{b-a} \sum_{i=a}^b x_i. \quad (1)$$

Для расчета математического ожидания трафика как функции $f(x)$ используется значение вероятности p_i проявления каждого из значений x_i функции трафика:

$$E[f(x)] = \sum_{i=a}^b x_i p_i. \quad (2)$$

При равномерном распределении величина математического ожидания вырождается в среднее значение.

Медиана представляет собой среднее значение при упорядочении элементов функции $f^*(x)$ от наименьшего значения к наибольшему:

$$\text{med} \left[f \left(\frac{x_{N+1}}{2} \right) \right], \quad (3)$$

где N – общее количество данных трафика $f(x)$ на интервале от $a = x_1$ до $b = x_2$.

Мода определяет одно или несколько значений функции $f(x)$, которые наиболее часто проявляются в обрабатываемом трафике.

Учитывая битовую последовательность трафика, тем не менее, целесообразность использования показателей медианы и моды оправдана в том случае, когда анализ производится на уровне пакетов [12, 13].

Гораздо больший интерес представляют показатели меры разброса местоположения, в качестве которых выступают:

– дисперсия, как средняя величина квадрата среднего значения:

$$\begin{aligned} D[f(x)] &= \sum_{i=a}^b p_i (x_i - E[f(x)])^2 = \\ &= \frac{1}{b-a-1} \sum_{i=a}^b (x_i - E[f(x)])^2; \end{aligned} \quad (4)$$

– среднеквадратическое отклонение, как квадратный корень из дисперсии:

$$\begin{aligned} S[f(x)] &= \sqrt{\sum_{i=a}^b p_i (x_i - E[f(x)])^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{i=a}^b (x_i - E[f(x)])^2}; \end{aligned} \quad (5)$$

– минимальные и максимальные размахи распределений функции $f(x)$, значения дисперсии рассчитаны в соответствии с формулой (4):

$$\min(D[f(x)]) \div \max(D[f(x)]); \quad (6)$$

– интерквартильный размах, представляющий разность между третьим $f(x_{0,75})$ и первым $f(x_{0,25})$; квартилями, т. е.:

$$f(x_{0,75}) - f(x_{0,25}); \quad (7)$$

– размах вариаций, т. е. различия значений какого-либо показателя:

$$R = \max[f(x)] - \min[f(x)]; \quad (8)$$

– для практики интерес представляет так называемый коэффициент осцилляции (относительный размах вариации):

$$\rho = \frac{R}{E[f(x)]} \quad (9)$$

и коэффициент вариации:

$$V = \frac{S[f(x)]}{E[f(x)]}, \quad (10)$$

а также доверительный интервал, определяющий границы, в пределах которых обеспечивается значение математического ожидания с заданной вероятностью.

К мерам формы относят коэффициенты асимметрии и перекоса:

$$A_s = \frac{\mu_3}{S^3[f(x)]}, \quad (11)$$

где μ_3 – третий центральный момент:

$$\mu_3 = E[(f(x) - E[f(x)])^3].$$

Коэффициент перекоса (эксцесса) характеризует меру остроты пика распределения, и рассчитывается по формуле [14]:

$$A_A = (\mu_4 / S^4[f(x)]) - 3, \quad (12)$$

где μ_4 – четвертый центральный момент:

$$\mu_4 = E[(f(x) - E[f(x)])^4].$$

Из представленных характеристик, согласно [10, 11], наиболее информативными для рассматриваемой проблематики являются среднее значение трафика, величина его дисперсии, среднеквадратическое отклонение, а также коэффициенты вариаций, асимметрии и перекоса.

На практике в качестве критерия обнаружения аномалий используют пороговые значения, рассчитанные по результатам статистической обработки потока данных [11, 15, 16]. Вместе с тем, существуют и более прогрессивные алгоритмы обнаружения неконтролируемых аномалий, основанных на анализе локального коэффициента выбросов (LOF, *аббр. от англ. Local Outlier Factor*) [17, 18], и оценки выбросов по результатам обработки гистограмм (HBO, *аббр. от англ. Histogramm-Based Outlier*) [4, 19, 20].

Широкое применение получил алгоритм обнаружения аномалий, основанный на использовании так называемых бинарных деревьев Isolation forest (iForest). Алгоритм разработан Фей Тони Лю, Кай Мин Тоном и Чжи-Хуа Чжоу в 2008 г. [21]; имеет линейную временную сложность и низкие требования к памяти, что позволяет работать с большими объемами данных. Его работа основана на предположении, что характеристики аномалий существенно отличаются друг от друга, что позволяет их идентифицировать.

Аналитически алгоритм iForest может быть записан в следующем виде [21–23]:

$$c(m) = \begin{cases} 2H(m-1) - \frac{2(m-1)}{n} & \text{for } m > 2; \\ 1 & \text{for } m = 2; \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (13)$$

где n – объем тестируемых данных; m – размер набора выборок; H – число оцениваемых гармоник согласно выражению:

$$H(i) = \ln(i) + \gamma,$$

где $\gamma = 0,5772156649$ – постоянная Эйлера – Маскерони [24].

Особенность алгоритма iForest в том, что его реализация не предполагает оценку плотности распределения трафика. Метод отсекает изолированные точки от нормальных кластеризованных. Поэтому алгоритм iForest работает быстро, поскольку

просто разделяет трафик данных, выбирая для этого случайным образом точку деления.

Алгоритм iForest неплохо зарекомендовал себя в области производства полупроводников. В частности, размерные и массивные характеристики данных оптической эмиссионной спектроскопии (OES, аббр. от англ. Optical Emission Spectroscopy) ограничивают достижимую производительность систем обнаружения аномалий. Для решения данной проблемы Л. Паггини и С. Маклун в [25] предложили осуществлять выбор переменных по результатам применения алгоритма iForest, позволившего не только обнаруживать аномалии, но и уменьшить размерность данных.

Также хорошо зарекомендовал себя алгоритм iForest при обработке больших объемов данных, обеспечивая приемлемую точность обнаружения аномалий. Однако в [26] выявлено ограничение: iForest позволяет установить, является ли выборка данных выбросом, вычисляя оценку аномалий.

Т. е. эффективность работы алгоритма iForest в значительной степени зависит от настройки оценки показателя аномалий, которая рассчитывается как:

$$s(x, m) = 2 \frac{-E[h(x)]}{c(m)},$$

где $E[h(x)]$ – среднее значение длины пути при рекурсивном секционировании данных, которое представляется древовидной структурой, именуемой деревом изоляции [21]; величина $c(m)$ рассчитывается в соответствии с выражением (13).

Поскольку в реальной промышленной сетевой среде можно полагаться только на опыт, полученный в ходе подбора соотношения $s(x, m)$, то, разумеется, нет гарантий того, что алгоритм iForest сможет обеспечить наилучшее быстроедействие при расчетах.

Неточные настройки параметров также могут приводить к уменьшению точности и увеличению количества ложных обнаружений в iForest. Кроме того, широкое применение в методах исследования сетевого трафика находят алгоритмы анализа плотности распределений временных рядов, в ходе которых оценивается стационарность, различия, определяется тренд, используется «снятие сезонности» и методы скользящего среднего, экспоненциального среднего, обнаружение и устранение выбросов, выравнивание по времени, преобразование и масштабирование данных, нормализация. Следует отметить, что для обнаружения аномалий методы исследования сетевого трафика практически не применяются [27].

Информативной мерой, характеризующей фрактальную размерность обрабатываемой выборки, является показатель Херста X_n , позволяющий вы-

являть долгосрочные зависимости временных рядов [8]. Чем ближе значение $X_n \rightarrow 1$, тем устойчивее зависимость. С указанных позиций показатель Херста в какой-то мере можно рассматривать как некоторую оценку устойчивости таких зависимостей, определяемых статистическими закономерностями.

Уникальность показателя Херста в том, что он тесно связан с такими широко известными параметрами временных рядов, как спектральный и фрактальный показатели S_n и F_n , а также корреляционный параметр K_n (таблица 1).

Связь показателя Херста с известными параметрами временных рядов можно представить в аналитическом виде:

$$\begin{aligned} K_n &= 2(1 - X_n); \\ S_n &= 2X_n + 1; \\ F_n &= 3 - 2X_n. \end{aligned}$$

Аналитически расчет показателя Херста осуществляется по формуле [28]:

$$E \left[\frac{R_{[a; b]}}{S[f(x)_{[a; b]}} \right] = C[a; b]^{X_n}, \quad (14)$$

где $[a; b]$ – интервал временного анализа; C – константа.

Согласно выражению (14), показатель Херста лишь опосредованно может характеризовать аномалии трафика.

И, наконец, корреляционный подход, предполагающий расчет как автокорреляционных функций, так и функций взаимной корреляции.

Автокорреляционная функция для трафика, согласно [24], рассчитывается в вид:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - E[f(x)])(x_{i+k} - E[f(x)])}{(N - \tau)D[f(x)]}. \quad (15)$$

В качестве числового показателя, характеризующего близость двух трафиков, например, текущего $f(x)$ и контрольного (эталонного) $g(x)$, используют коэффициент корреляции Пирсона [24, 29]:

$$r_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - E[f(x)])(x_i - E[g(x)])}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - E[f(x)])^2 \sum_{i=1}^N (x_i - E[g(x)])^2}}. \quad (16)$$

Рассмотренный арсенал широко известных инструментов анализа трафика позволяет сделать вывод, что для исследования аномалий трафика, представленного в виде битового потока к уже отмеченным подходам, с использованием среднего значения трафика, величина его дисперсии, а также коэффициенты вариаций, асимметрии и перекоса, следует применять алгоритм iForest и коэффициент корреляции Пирсона.

Обоснование подхода к обнаружению аномалий трафика по результатам обработки его фреймового вейвлет-преобразования

Практическое применение в обработке сигналов вейвлет-преобразование получило благодаря работам С. Маллата [9, 30], который обосновал, что в ряде приложений целесообразно использовать для обработки вместо временных отсчетов сигналов их вейвлет-коэффициенты.

В продолжение развития этого направления в [31] предложено вместо вейвлет-коэффициентов выбирать коэффициенты преобразования сигнала в базисе материнского вейвлета из матрицы формируемого фрейма.

Если принимать непрерывное вейвлет-преобразование как свертку обрабатываемого процесса $z(t)$ с кратномасштабными копиями формирующего материнского вейвлета [32]:

$$W(k, n) = \frac{1}{\sqrt{k}} \int_{-\infty}^{\infty} z(t) \psi_{k,n}(t) dt, \quad (17)$$

где

$$\psi_{k,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{k}} \psi\left(\frac{t-n}{k}\right), \quad (18)$$

то с математических позиций параметры n и k являются непрерывными.

Таким образом в [31], применительно к дискретному набору данных предложено работать не со всем обрабатываемым процессом, а с его частью, выборкой или фреймом, что позволило выражение (17) преобразовать к виду:

$$W_k(n) = \frac{1}{\sqrt{k}} \sum_{i=a}^b z(x_i) \psi\left(\frac{x_i - n}{k}\right). \quad (19)$$

Формально выражение (19) сохраняет большую часть положительных свойств непрерывного вейвлет-преобразования, что позволяет его считать кратномасштабным преобразованием процесса $z(t)$ на длительности фрейма в интервале от a до b . В качестве примера на рисунке 1а показана матрица фреймового преобразования битового потока в виде тестового сигнала $z1$ в интервале 32 отсчетов, содержащего последовательность повторяющихся нулей и единиц. В качестве формирующего определен материнский вейвлет Хаара.

Переход от непосредственного представления сигнала в виде его дискретных отсчетов к коэффициентам, сформированным из матриц его вейвлет-преобразований, обусловлен тем, что в результате происходит повышение его контрастности по отношению к другим временным рядам с близкой структурой, определяемой их элементами. Данный переход обоснован в [33].

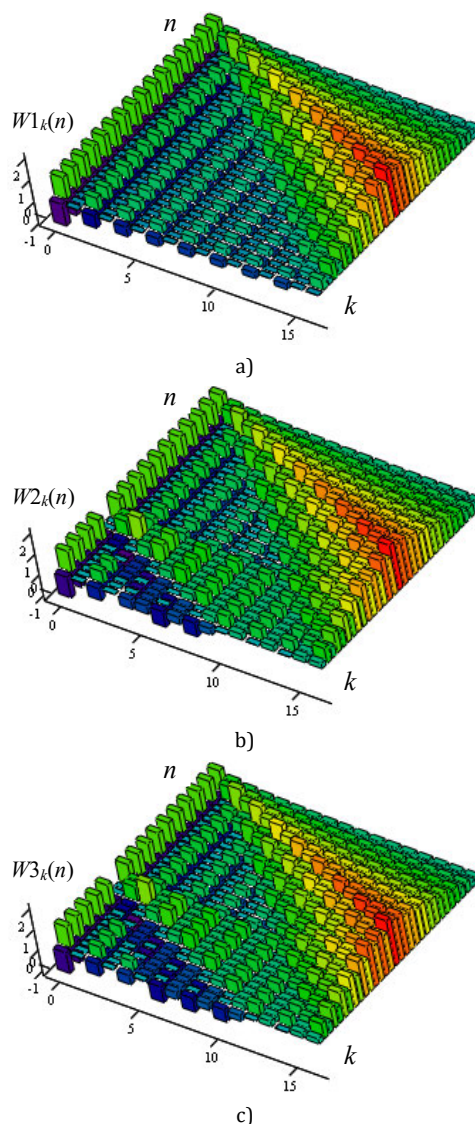


Рис. 1. Матрица фреймового вейвлет-преобразования тестового сигнала: а) $z1$; б) $z2$; в) $z3$

Fig. 1. Frame Wavelet Transform Matrix of the Test Signal: а) $z1$; б) $z2$; в) $z3$

Следовательно, можно выдвинуть гипотезу, что если рассматривать два битовых потока с близким, но не совпадающим набором 0 и 1, то после вейвлет-преобразований этих потоков контрастность их различий усилится.

Рассмотрим три битовых потока:

$z1 = \{010101010101010101010101010101\};$

$z2 = \{010101010111010101010101010101\};$

$z3 = \{010101010101110101010101010101\}.$

Будем полагать, что поток $z1$ является эталонным, а потоки $z2$ и $z3$ содержат аномалии в виде трех последовательных 1. Для потоков $z2$ и $z3$, в соответствии с выражением (19), были реализованы их фреймовые вейвлет-преобразования (для потока $z1$ фреймовое вейвлет-преобразование аналогично изображенному на рисунке 1а).

Полученные матрицы явились исходными данными для формирования на их основе преобразованных потоков $s1$, $s2$ и $s3$, посредством выбора соответствующих коэффициентов вдоль оси сдвигов n . В результате предоставляется возможность отбора коэффициентов матриц, обеспечивающих наибольшую информативность об аномалии исходного потока. Критерием такого отбора были определены коэффициенты корреляции Пирсона (16). Результаты представлены в таблице 1.

Результаты таблицы 1 ограничены $n = 13$, поскольку при дальнейшем увеличении n коэффициент Пирсона сохраняет свое значение, равное 1.

ТАБЛИЦА 1. Значение коэффициента Пирсона между коэффициентами матриц кратномасштабного преобразования

TABLE 1. Pearson Coefficient Value between the Coefficients of the Multiple-Scale Transformation Matrices

Потоки	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$z1$ и $z2$	$rs1s2$	0,762	0,722	0,76	0,635	0,815	0,667	0,835	0,634	0,877	0,715	0,888	0,65	0,964	1
$z1$ и $z3$	$rs1s2$	0,723	0,626	0,773	0,612	0,782	0,548	0,843	0,624	0,848	0,513	0,945	1	1	1

В качестве примера на рисунке 2 показаны потоки коэффициентов кратномасштабного преобразования, соответствующие значению $k = 5$, при котором обеспечиваются наибольшие различия.

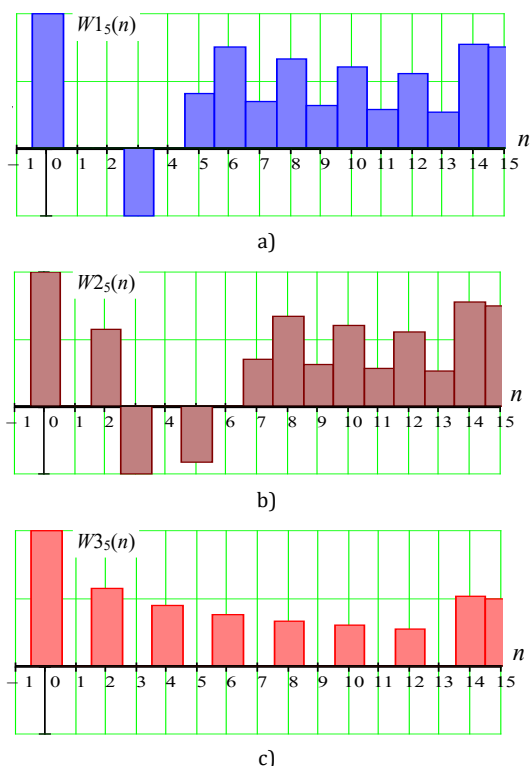


Рис. 4. Коэффициенты матрицы фреймового вейвлет-преобразования тестовых потоков: а) $z1$; б) $z2$; в) $z3$

Fig. 4. Coefficients of the Frame Wavelet Transform Matrix of the Test Stream: a) $z1$; b) $z2$; c) $z3$

Важным моментом полученных результатов является то, что, несмотря на одинаковую аномалию в абсолютном значении исходных потоков, расчетные величины коэффициентов Пирсона их кратномасштабных коэффициентов различны. В то же время значение коэффициентов Пирсона для исходных потоков одинаковы: $rz1z3 = rz1z2 = 0,939$.

Данный факт открывает перспективу не только повысить вероятность обнаружения аномалии, поскольку, согласно таблице 1, различия между коэффициентами матриц кратномасштабного преобразования потоков гораздо сильнее, чем между самими потоками.

Следует отметить, что выбор коэффициентов матрицы возможен и вдоль оси k , но получаемые в этом случае коэффициенты менее контрастны, т. е. информативны. Различия в абсолютных значениях коэффициентов Пирсона потоков, составленных из коэффициентов матриц их кратномасштабных преобразований, открывают возможность не только повышать вероятность их обнаружения ввиду большей контрастности, но и позиционировать местоположение аномалий в пределах потока данных.

Необходимо добавить, что статистические параметры потока, рассмотренные в предыдущем разделе, еще менее информативны. В таблице 2 представлены результаты расчетов статистических параметров потоков $z1$, $z2$ и $z3$, согласно которым следует, что все параметры потоков $z2$ и $z3$, традиционно рассчитываемые при статистической обработке, одинаковы, несмотря на различия расположения аномалий в их структуре. Поэтому использование результатов статистического анализа, включая расчетные значения коэффициента корреляции Пирсона, не позволят идентифицировать положение локаций аномалии.

В то же время значения коэффициента корреляции Пирсона, рассчитанные на основе элементов матриц фреймового вейвлет-преобразования указанных потоков по отношению к эталонному, существенно отличаются. При этом указанные различия настолько существенны, что могут выступать индикаторами, не только характеризующими положение возникшей аномалии в пределах обрабатываемого потока, но и идентифицировать структуру самой аномалии.

ТАБЛИЦА 2. Значение статистических параметров, характеризующих поток z_1 , z_2 и z_3

TABLE 2. The Value of Statistical Parameters Characterizing the Flow z_1 , z_2 and z_3

Параметр	$E[*]$	$D[*]$	V	A_s	A_A	rz_1z_2	rz_1z_3	X_n	$c(m)$
z_1	0,5	0,25	1	3	7	0,939	0,939	–	0,984
z_2	0,563	0,246	0,882	3,15	7,635	0,939	–	0,53	0,986
z_3	0,563	0,246	0,882	3,15	7,635	–	0,939	0,53	0,985

Заключение

Анализ результатов таблицы 2 позволяет заключить, что среди стандартных широко используемых статистических характеристик потоков наиболее информативным является алгоритм iForest. Однако предложенный подход позволяет получить более ярко выраженные различия.

Представленные исследования открывают новый взгляд на решение вопроса не только обнару-

жения аномалии, но и ее локализации в структуре трафика битового потока. Задача локализации положения потока может быть обеспечена на основе приложения элементов распознавания образов, реализованных в [20]. Данное направление, по мнению авторов, является перспективным для дальнейшего исследования. Кроме того, повышение различий трафиков авторы связывают с использованием методов частотно-временного анализа [31].

Список источников

1. Колчина О.А., Лесничая М.А. Оценка дифференциации развития муниципальных образований по уровню и качеству жизни населения в условиях цифровой трансформации // Экономика и предпринимательство. 2020. № 11(124). С. 578–584. DOI:10.34925/EIP.2020.124.11.108. EDN:WCNVSU
2. Askaruly B., Abitova G.A. Hybrid information systems modeling technology for business process analysis based on the internet of things // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. 2023. Iss. 3(11). PP. 19–28. DOI:10.53360/2788-7995-2023-3(11)-2. EDN:QGULYH
3. Larsson E., Bratt E., Palmqvist J., Söderberg A., Hall A. Internet of things as a complement to increase safety // Journal of the Belarusian State University. International Relations. 2020. Iss. 1. PP. 88–93. EDN:NYVGQK
4. Лизнев Д.С. Обзор методов прогнозирования сетевых аномалий // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17. № 2. С. 44–50. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-2-44-50. EDN:RPMMTF
5. Орехов А.В., Орехов А.А. Автоматическое обнаружение аномалий сетевого трафика при DDoS-атаках // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2023. Т. 19. № 2. С. 251–263. DOI:10.21638/11701/spbu10.2023.210. EDN:XYNCXN
6. Гайфулина Д.А., Котенко И.В. Анализ моделей глубокого обучения для задач обнаружения сетевых аномалий интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 1(110). С. 28–37. DOI:10.31799/1684-8853-2021-1-28-37. EDN:DTPPJY
7. Ажмухамедов И.М., Марьенков А.Н. Поиск и оценка аномалий сетевого трафика на основе циклического анализа // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2(20). С. 17–26. EDN:PCRQQT
8. Kotenko I.V., Saenko I.B., Kushnerevich A.S. Parallel big data processing system for security monitoring in Internet of Things networks // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing and Reliable Applications (JoWUA). 2017. Vol. 8. Iss. 4. PP. 60–74. DOI:10.22667/JOWUA.2017.12.31.060
9. Mallat S.G. A Theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. Vol. 11. Iss. 7. PP. 674–693. DOI:10.1109/34.192463
10. Поздняк И.С., Плаван А.И. Выявление DOS-атак с помощью анализа статистических характеристик трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 1. С. 73–80. DOI:10.18469/ikt.2021.19.1.10. EDN:CTTSUN
11. Шелухин О.И., Сударигов Р.А. Анализ информативных признаков в задачах обнаружения аномалий трафика статистическими методами // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 3. С. 14–18. EDN:SGINFZ
12. Дворников С.В., Погорелов А.А., Вознюк М.А., Иванов Р.В. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32–35. EDN:VPQCFF
13. Симаков Д.В., Кучин А.А. Анализ статистических характеристик Интернет-трафика в магистральном канале // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 11. С. 95–98. EDN:TESPPD
14. Калистратова А.В., Никитин А.А. Исследование уравнивания Дикмана с интегральными ядрами, имеющими переменное значение коэффициентов эксцесса // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 6. С. 628–631. DOI:10.7868/S086956521630006X. EDN:WOSDQV
15. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999. 204 с.
16. Попов И.Ю. Метод настройки параметров алгоритма локальных коэффициентов выбросов для поиска сетевых аномалий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 8(98). С. 88–91. EDN:DWUTUV
17. Нестерова Е.С. Алгоритм локальных коэффициентов выбросов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2019. № 26-2. С. 41–43. EDN:FWQJQH
18. Денисова А.Ю., Мясников В.В. Обнаружение аномалий на гиперспектральных изображениях // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 2. С. 287–296. DOI:10.18287/0134-2452-2014-38-2-287-296. EDN:SFAZCT

19. Васильева Д.В., Дворников С.С., Толстуха Ю.Е., Обрезков П.С., Дворников С.В. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 4. С. 62–68. EDN:NZSBEJ
20. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation Forest // Proceedings of the 8th International Conference on Data Mining (Pisa, Italy, 15–19 December 2008). IEEE, 2008. PP. 413–422. DOI:10.1109/ICDM.2008.17
21. Краснов Ф.В., Смазневич И.С., Баскакова Е.Н. Оптимизационный подход к выбору методов обнаружения аномалий в однородных текстовых коллекциях // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 4. С. 869–904. DOI:10.15622/ia.20.4.5. EDN:XWIIJOS
22. Шелухин О.И., Полковников М.В. Применение алгоритма «Изолирующий Лес» для решения задач обнаружения аномалий // Решение. 2019. Т. 1. С. 186–188. EDN:SSIRSY
23. Bol G. Deskriptive Statistik. Oldenbourg: Oldenburg Verlag, 2004.
24. Puggini L., McLoone S. An enhanced variable selection and Isolation Forest based methodology for anomaly detection with OES data // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. Vol. 67. PP. 126–135. DOI:10.1016/j.engappai.2017.09.021
25. Spiekermann D., Keller J. Unsupervised packet-based anomaly detection in virtual networks // Computer Networks. 2021. Vol. 192. P. 108017. DOI:10.1016/j.comnet.2021.108017
26. Ahmed M., Mahmood A., Hu J. A Survey of Network Anomaly Detection Techniques // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. Iss. 1. PP. 19–31. DOI:10.1016/j.jnca.2015.11.016
27. Калуж Ю.А., Логинов В.М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Т. 5. № 4(12). С. 29–37. EDN:HZOKUN
28. Dvornikov S.-Jr., Dvornikov S. Detection Range Estimation of Small UAVs at a Given Probability of Their Identification // Proceedings of Telecommunication Universities. 2023. Vol. 9. Iss. 4. PP. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-6-13. EDN:YLBWOS
29. Умбиталиев А.А., Дворников С.В., Оков И.Н., Устинов А.А. Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразований // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 3. С. 100–106. EDN:UMOIVJ
30. Mallat S.G., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. Vol. 41. Iss. 12. PP. 3397–3415. DOI:10.1109/78.258082
31. Alzhanov A., Nugumanova A., Sutula M. Research on crop classification methods based on machine learning using wavelet transformations // Eurasian Journal of Applied Biotechnology. 2023. Iss. 2. PP. 52–60. DOI:10.11134/btp.2.2023.7. EDN:ZKFOAC
32. Новиков И.Я., Протасов В.Ю., Скопина М.А. Теория всплесков. М.: Физматлит, 2005. 616 с.

References

1. Kolchina O.A., Lesnichaya M.A. Assessment of the Differentiation of Municipalities Development by People's Living Standards and Their Quality of Life in the Digital Transformation Conditions. *Economics and Entrepreneurship*. 2020;11(124):578–584. (in Russ.) DOI:10.34925/EIP.2020.124.11.108. EDN:WCNVSU
2. Askaruly B., Abitova G.A. Hybrid information systems modeling technology for business process analysis based on the internet of things. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*. 2023;3(11):19–28. DOI:10.53360/2788-7995-2023-3(11)-2. EDN:QGULYH
3. Larsson E., Bratt E., Palmqvist J., Söderberg A., Hall A. Internet of things as a complement to increase safety. *Journal of the Belarusian State University. International Relations*. 2020;1:88–93. EDN:NYVGQK
4. Lisnev D.S. Review of methods for forecasting network anomalies. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2023;17(2):44–50. (in Russ.) DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-2-44-50. EDN:RPMMTF
5. Orekhov A.V., Orekhov A.A. Automatic detection of network traffic anomalies in DDoS attacks. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2023;19(2):251–263. (in Russ.) DOI:10.21638/11701/spbu10.2023.210. EDN:XYNCXN
6. Gaifulina D.A., Kotenko I.V. Analysis of deep learning models for the tasks of detecting network anomalies of the Internet of Things. *Information and Control Systems*. 2021;1(110):28–37. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2021-1-28-37. EDN:DTPPJY
7. Azhmukhamedov I.M., Marienkov A.N. Search and evaluation of network traffic anomalies based on cyclic analysis. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2012;2(20):17–26. (in Russ.) EDN:PCRPQT
8. Kotenko I.V., Saenko I.B., Kushnerevich A.S. Parallel big data processing system for security monitoring in Internet of Things networks. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing and Reliable Applications (JoWUA)*. 2017;8(4):60–74. DOI:10.22667/JOWUA.2017.12.31.060
9. Mallat S.G. A Theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989;11(7):674–693. DOI:10.1109/34.192463
10. Pozdnyak I.S., Plavan A.I. Identification of DOS attacks by analyzing statistical characteristics of traffic. *Infocommunication Technologies*. 2021;19(1):73–80. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2021.19.1.10. EDN:CTTSUN
11. Shelukhin O.I., Sudarikov R.A. Analysis of informative signs in the tasks of detecting traffic anomalies by statistical methods. *T-Comm*. 2014;8(3):14–18. (in Russ.) EDN:SGIHFF
12. Dvornikov S.V., Pogorelov A.A., Voznyuk M.A., Ivanov R.V. Assessment of the immunity of control channels with frequency modulation. *Information and Space*. 2016;1:32–35. (in Russ.) EDN:VPQCFF
13. Simakov D.V., Kuchin A.A. Analysis of statistical characteristics of Internet traffic in the trunk channel. *T-Comm*. 2014;8(11):95–98. (in Russ.) EDN:TESPPD
14. Kalistratova A.V., Nikitin A.A. Investigation of the Dikman equation with integral kernels having variable values of kurtosis coefficients. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(6):628–631. (in Russ.) DOI:10.7868/S086956521630006X. EDN:WOSDQV

15. Vorobyov V.I., Gribunin V.G. *Theory and Practice of the Wavelet Transform*. St. Petersburg: VUS Publ.; 1999. 204 p. (in Russ.)
16. Popov I.Y. Method of setting parameters of the algorithm of local emission coefficients for searching for network anomalies. *Science and Business: Ways of Development*. 2019;8(98):88–91. (in Russ.) EDN:DWUTUV
17. Nesterova E.S. Algorithm of local emission coefficients. *Fundamental and Applied Research in the Modern World*. 2019; 26-2:41–43. (in Russ.) EDN:FWQJQH
18. Denisova A.Yu., Myasnikov V.V. Detection of anomalies in hyperspectral images. *Computer Optics*. 2014;38:2:287–296. DOI:10.18287/0134-2452-2014-38-2-287-296. (in Russ.) EDN:SFAZCT
19. Vasilyeva D.V., Dvornikov S.S., Tolstukha Yu.E., Obrezkov P.S., Dvornikov S.V. Formation of feature vectors for video surveillance systems. *Voprosy radioelektroniki Seriya Tekhnika televideeniia*. 2023;4:62–68. (in Russ.) EDN:NZSBEJ
20. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation Forest. *Proceedings of the 8th International Conference on Data Mining, 15–19 December 2008, Pisa, Italy*. IEEE; 2008. p.413–422. DOI:10.1109/ICDM.2008.17
21. Krasnov F.V., Smaznevich I.S., Baskakova E.N. Optimization approach to the choice of methods for detecting anomalies in homogeneous text collections. *Informatics and Automation*. 2021;20(4):869–904. (in Russ.) DOI:10.15622/ia.20.4.5. EDN:XWIJOS
22. Shelukhin O.I., Polkovnikov M.V. Application of the "Isolating Forest" algorithm for solving problems of anomaly detection. *Reshenie*. 2019;1:186–188. (in Russ.) EDN:SSIRSY
23. Bol G. *Deskriptivnaya Statistika*. Oldenbourg: Oldenbourg Verlag; 2004.
24. Puggini L., McLoone S. An enhanced variable selection and Isolation Forest based methodology for anomaly detection with OES data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018;67:126–135. DOI:10.1016/j.engappai.2017.09.021
25. Shpikerman D., Keller J. Anomaly detection based on uncontrolled packets in virtual networks. *Computer Networks*. 2021;192:108017. DOI:10.1016/j.comnet.2021.108017
26. Ahmed M., Mahmoud A., Hu J. A Survey of Network Anomaly Detection Techniques. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;60:19–31. DOI:10.1016/j.jnca.2015.11.016
27. Kalush Yu.A., Loginov V.M. The Hurst index and its hidden properties. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2002;5(4(12)):29–37. (in Russ.) EDN:HZOKUN
28. Dvornikov S.-Jr., Dvornikov S. Detection Range Estimation of Small UAVs at a Given Probability of Their Identification. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(4):6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-6-13. EDN:YLBWOS
29. Umbitaliev A.A., Dvornikov S.V., Okovs I.N., Ustinov A.A. Compression method graphic files using wavelet transform. *Voprosy radioelektroniki Seriya Tekhnika televideeniia*. 2015;3:100–106. (in Russ.) EDN:UMOIVJ
30. Mallat S.G., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993;41(12):3397–3415. DOI:10.1109/78.258082
31. Dvornikov S.V., Stepynin D.V., Dvornikov A.S., Bukareva A.P. Formation of signal feature vectors from the wavelet coefficients of their frame transformations. *Information Technologies*. 2013;5:46–49. EDN:QAQWUF
32. Novikov I.Ya., Protasov V.Yu., Skopina M.A. *Theory of Bursts*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2005. 616 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.07.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 30.09.2024.

The article was submitted 21.07.2024; approved after reviewing 06.09.2024; accepted for publication 30.09.2024.

Информация об авторах:

ЖДАНОВА
Инна Михайловна

адъютант Военной академии связи имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0007-3997-2332>

ДВОРНИКОВ
Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

ДВОРНИКОВ
Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Дворников С.В. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Dvornikov S.V. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.

Научная статья

УДК 621.317.341.3; 53.096; 53.093

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-24-33>

Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах

Виталий Николаевич Невежин , vitalayzerman@mail.ru

Максим Евгеньевич Комнатнов, maxmek@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634050, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Обеспечение надежной и бесперебойной радиосвязи критически важно при изменении климатических условий ее эксплуатации. Совместное воздействие температуры и влажности воздуха может привести к изменению электрических характеристик приемопередающих устройств и тем самым нарушить канал связи. В сложных климатических условиях эксплуатации, за счет постоянного изменения температуры на поверхности входящих в состав печатных плат (ПП) может образовываться конденсат, влияющий на работоспособность всего устройства. В этой связи электрические характеристики изменяются, что необходимо учитывать при проектировании критичной радиоэлектронной аппаратуры. Следовательно, целесообразна оценка климатических воздействий на линии передачи, расположенные на печатных платах в широком диапазоне частот, что требует разработки новых моделей и методик.

Цель работы: оценить влияние температуры тонкой пленки воды на поверхности микрополосковой линии передачи (МЛП) на ее частотные зависимости S-параметров с помощью **методов** конечных элементов и лабораторных экспериментов.

Результаты. Представлена методика учета воздействия температуры и влажности окружающей среды на электрические характеристики МЛП, позволяющая оценить изменение S-параметров линии в широких диапазонах частот, температур и влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды. Измерены S-параметры воды в контейнере, размещенном внутри коаксиальной камеры, в диапазонах частот и температур от 10 МГц до 12 ГГц и от -50 до 100 °C, соответственно. Используя представленную модель, вычислены частотные зависимости электропроводности воды при разных температурах. Показано, что при положительной температуре электропроводность может достигать $6,5$ См/м, а при отрицательной $-1,3$ См/м. Разработанная методика позволяет оценить влияние различной электропроводности воды на S-параметры МЛП. Показано влияние толщины слоя воды и льда на S-параметры МЛП. Выявлено, что модели, описывающие электропроводность воды, оказывают отличное влияние на электрические параметры линии передачи. **Новизна:** представлена методика учета влияния температуры и влажности окружающей среды на S-параметры линии передачи, отличающаяся использованием модели электропроводности воды на основе вносимых потерь, вычисленных из измеренных S-параметров коаксиальной камеры с водой в контейнере при изменении ее температуры. **Практическая значимость** представленной модели и методики позволяет оценить S-параметры линии в широких диапазонах частот, температур и влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды.

Ключевые слова: коаксиальная камера, вода, температурные измерения, S-параметры, электропроводность

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: Невежин В.Н., Комнатнов М.Е. Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 24–33. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45. EDN:EORDYI

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-24-33>

Evaluation the Influence of Thin Film of Water on the Frequency Dependences of Transmission Line S-Parameters at Positive and Negative Temperatures

 Vitaliy N. Neveznin ✉, vitalayzerman@mail.ru Maksim E. Komnatnov, maxmek@mail.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, 634050, Russian Federation

Annotation

Relevance. Provision of reliable and uninterrupted radio communication is critically important under changing climatic conditions of its operation. The combined effect of temperature and humidity can lead to changes in the electrical characteristics of transceiving devices and thereby disrupt the communication channel. In difficult climatic conditions of operation, due to constant temperature changes on the surface of the printed circuit boards, which are part of them, condensation can form, affecting the performance of the entire device. In this regard, the electrical characteristics change, which must be taken into account when designing critical REE. When designing transmission lines on printed circuit boards, it is reasonable to evaluate climatic impacts on it in a wide frequency range, which requires the development of new models and methods that allow taking into account these impacts.

Goal of the work: to evaluate the influence of the temperature of a thin film of water on the surface of a microstrip transmission line on its frequency dependences of S-parameters. Finite element methods and laboratory experiment were used.

Results. A methodology to account for the effects of ambient temperature and humidity on the electrical characteristics of a microstrip transmission line (MTL) is presented, which allows evaluating the variation of the S-parameters of the line over wide ranges of frequencies, air temperature and humidity, as well as the chemical composition of the environment. The S-parameters of water in a container placed inside a coaxial chamber are measured over the frequency and temperature ranges of 10 MHz to 12 GHz and minus 50 to 100°C, respectively. Using the presented model, the frequency dependences of the electrical conductivity of water at different temperatures are calculated. It is shown that at positive temperature, the electrical conductivity can reach 6.5 Sm/m and at negative temperature it can reach 1.3 Sm/m. Using the developed methodology, the influence of different water electrical conductivity on the S-parameters of MTLs is evaluated. The influence of water and ice layer thickness on the S-parameters of MTLs was shown. It is found that models describing the electrical conductivity of water have an excellent influence on the electrical parameters of the transmission line. **Novelty.** A method of accounting for the influence of ambient temperature and humidity on the S-parameters of the transmission line is presented, which is characterized by the use of a model of water conductivity based on insertion losses calculated from the measured S-parameters of a coaxial chamber with water in the container when its temperature is changed.

Practical significance: a model and a methodology for taking into account the impact of temperature and humidity of the environment on the MTL characteristics are presented, allowing estimating the S-parameters of the line in a wide range of frequencies, air temperature and humidity, as well as the chemical composition of the environment.

Keywords: coaxial cell, water, temperature measurements, S-parameters, electrical conductivity

Funding: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEWM2024-0005.

For citation: Neveznin V.N., Komnatnov M.E. Evaluating the Influence of Thin Film of Water on the Frequency Dependences of Transmission Line S-Parameters at Positive and Negative Temperatures. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):24–33. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-36-45. EDN:EORDYI

Введение

Обеспечение бесперебойной связи в сложных климатических условиях крайне важно. Воздействие температуры и влажности на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) средств связи, оказывает различное влияние на их электрические характеристики из-за растворенных в воде веществ. Различия в солености морей отличает воду по электрофизическим параметрам [1]. Конденсация воды с неодинаковым химическим составом на линии передачи, расположенных на печатных платах (ПП) может оказать различное влияние на ее электрические характеристики.

РЭА содержит множество различных компонентов, расположенных на ПП. Воздействие температуры (T , °C) и влажности воздуха на ПП с компонентами может привести к изменению ее электрических характеристик и преждевременным отказу или сбою. В жестких условиях эксплуатации РЭА ее компоненты могут нагреваться или охлаждаться, что создает градиент температур вокруг них и вызывает конденсацию воды внутри корпуса. Это влияет на производительность РЭА и потребление ею электроэнергии [2–4]. При влажности воздуха более 50 % возникает риск конденсации воды на поверхности ПП в виде тонкой водяной пленки, влияющей на ее работоспособность [5]. Установлено [6], что при влажности воздуха до 70 % возможность выхода из строя РЭА минимальна, при влажности свыше 85 % – более вероятна, а при 100 % вода появляется на ПП, и риск отказа РЭА максимален. В этой связи четверть всех отказов РЭА связана с влажностью, а половина – непосредственно с температурой [7].

В зависимости от агрегатного состояния воды изменяется ее комплексная диэлектрическая проницаемость ($\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$), включающая электропроводность (σ) и относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ_r) [8, 9], различно влияющие на электрические характеристики компонентов РЭА. Так, при образовании на микрополосковой антенне воды в жидком или твердом агрегатных состояниях, ее основная частота смещается, в связи с изменением ϵ_r воды в жидком ($\epsilon_r \approx 80$) и в твердом ($\epsilon_r \approx 3,2$) агрегатных состояниях [10]. Спиральные антенны на ПП могут использоваться в летательных аппаратах, а появление конденсата в различных местах на антенне снижает их эффективность и вносит помехи на низких и высоких частотах в зависимости от места появления конденсата, что ослабляет амплитуду полезного сигнала по сравнению с уровнем помех [11].

В результате на начальных этапах проектирования необходимо учитывать изменения электрофизических параметров воды от температуры при оценке воздействия влажности на ПП с компонен-

тами, что позволит снизить риск отказа узла или блока критичной РЭА, а также повысить их надежность. Подобную оценку можно провести с помощью модели, описывающей электрические свойства тонкой пленки воды от температуры, расположенной на поверхности ПП. Используя параметрическую модель Коул-Коула [12, 13], оценивают частотную зависимость σ для разных жидкостей от температуры. Измерение σ жидкостей (до 2,5 См/м) проводят в диапазоне частот 0,01–1 МГц, используя емкостную ячейку [14, 15]. При этом не существует однозначной электрофизической модели воды, учитывающей воздействие температуры, а известные применяются при определенных условиях [16].

Таким образом, необходимо учитывать изменение электрических характеристик в широких диапазонах температур, частот и влажности воздуха, что актуально при проектировании критичной РЭА, эксплуатируемой в сложных климатических условиях. Целью работы является оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S -параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах.

Модель для оценки электропроводности воды в коаксиальной камере на основе измерения ее S -параметров при разных температурах

Разработана модель для оценки σ воды, основанная на вычислении уровня вносимых потерь (ВП), используя измеренные частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с водой при изменении ее температуры.

ВП водой вычисляются из измеренных частотных зависимостей ненагруженной (пустая камера) ($|S_{21U}|$) и нагруженной (камера с материалом) ($|S_{21L}|$) коаксиальной камеры [17] как:

$$ВП = 20 \lg(|S_{21U}|/|S_{21L}|). \quad (1)$$

Равномерное распределение воды в центре коаксиальной камеры возможно выполнить при использовании дополнительной конструкции, которая является плоским контейнером из материала с $\epsilon_r \approx 2$. ВП могут быть вычислены для пустого контейнера ($ВП' = |S_{21U}| / |S_{21ПК}|$) и заполненного ($ВП'' = |S_{21U}| / |S_{213К}|$) через значения $|S_{21}|$ для пустой камеры ($|S_{21U}|$) и с пустым контейнером ($|S_{21ПК}|$), а также камеры с контейнером, заполненным водой ($|S_{213К}|$). ВП воды без учета контейнера могут быть вычислены через отношение $ВП'' / ВП'$. При этом ВП водой, вычисленные по (1), могут быть приравнены к ВП для нагруженной материалом коаксиальной камеры, аналогично учитывающем тепловые потери и потери на отражения согласно [18], вычисленным по выражению:

$$ВП = 20 \lg(1 + 0,5Z\sigma d), \quad (2)$$

где Z – характеристическое сопротивление коаксиальной камеры; d – толщина воды в контейнере.

При известных ВП для воды из (2) можно получить σ воды в коаксиальной камере:

$$\sigma = \left(\left| \frac{S_{21 \text{ ПК}}}{S_{21 \text{ ЗК}}} \right| - 1 \right) \frac{2}{Zd}. \quad (3)$$

В результате измеренные S -параметры пустой коаксиальной камеры и камеры с полым и заполненным водой контейнером при разных температурах позволят вычислить σ воды при разных ее температурах или агрегатных состояниях.

Измерение S -параметров коаксиальной камеры с водой при изменении ее температуры

Для измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры (рисунок 1а) с водой создан контейнер цилиндрической формы объемом 5 мл из тефлона ($\epsilon_r = 2,1$) с одинаковыми толщинами ($t = 2$ мм) стенок и крышки (рисунок 1б). Тефлон выбран, поскольку обладает химически инертными свойствами и не деформируется, а его электрические свойства практически не изменяются в широком диапазоне температур. Объем 5 мл выбран на основе [19] для меньшего влияния стенок контейнера на результаты измерения S -параметров коаксиальной камеры с водой.



a)



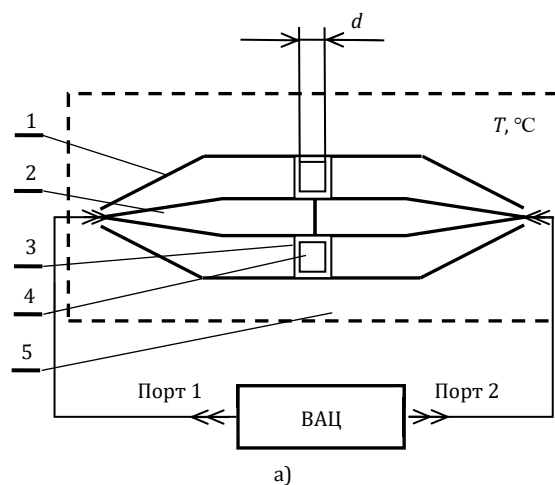
b)

Рис. 1. Коаксиальная камера (а) с контейнером объемом 5 мл (b)

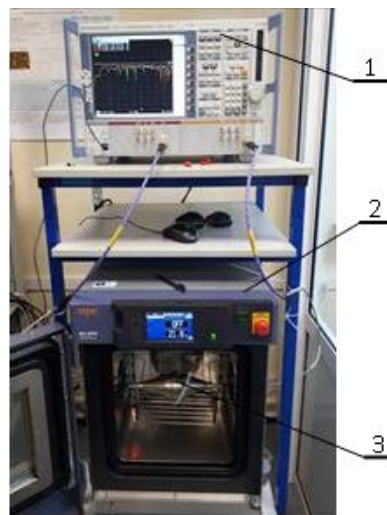
Fig. 1. Coaxial Cell (a) with 5 ml Container (b)

Измерения S -параметров проводились при помощи установки, схема (рисунок 2а) которой содержит векторный анализатор цепей (ВАЦ): внешний (1) и внутренний (2) проводники коаксиальной камеры, с размещенным внутри нее контейнером (3), заполненным водой (4). Коаксиальная

камера размещается внутри камеры «тепло-холод» (5). Собрана установка (рисунок 2б), содержащая ВАЦ Rohde & Schwarz ZVA 40 1, камеру «тепло-холод» ESPEC SU-262 2 и коаксиальную камеру (3) с верхней граничной частотой 12 ГГц [20]. Измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой проводились в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц каждые 30 с, используя ВАЦ. Толщина воды (d) в контейнере 5 мл составляла 10 мм. Температура внутри камеры «тепло-холод» изменялась в двух диапазонах: от 25 до 100 °С и от 25 до –50 °С. Стенки контейнера герметизировались в местах стыка для устранения протекания воды под воздействием высоких температур.



a)



b)

Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (b) установки для измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой при изменении температуры

Fig. 2. Schematic (a) and External View (b) of the Installation for Measuring Frequency Dependencies of S -Parameters in a Coaxial Cell with Water during Temperature Changes

Частотные зависимости S -параметров пустой коаксиальной камеры и при размещении внутри нее полого контейнера объемом 5 мл представлены на рисунке 3.

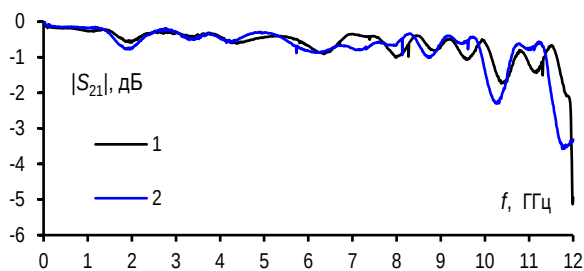


Рис. 3. Частотные зависимости $|S_{21}|$ пустой (1) коаксиальной камеры и с контейнером объемом 5 мл (2)

Fig. 3. Frequency Dependences $|S_{21}|$ of an Empty (1) Coaxial Cell and with a 5 ml Container (2)

Из рисунка 3 видно, что для пустой камеры и с полным контейнером различия в значениях $|S_{21}|$ незначительны (до 0,5 дБ) до частоты 10 ГГц. Свыше 10 ГГц разница увеличивается и достигает 1,5 дБ у 12 ГГц. В результате контейнеры минимально влияют на частотную зависимость $|S_{21}|$ коаксиальной камеры.

Измерены частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с размещенным внутри нее пластиковым контейнером объемом 5 мл, заполненным водой, и при изменении температуры от минус 50 до 100 °С с шагом 25 °С (рисунок 4).

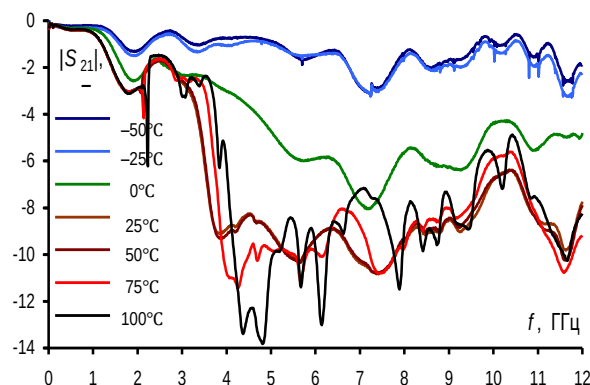


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с водой в контейнере при изменении их температуры от -50 до 100 °С

Fig. 4. Frequency Dependences $|S_{21}|$ of the Coaxial Cell with Water in the Container When Their Temperature Changes from -50 to 100 °С

Вода в жидком состоянии больше влияет на $|S_{21}|$ при положительных температурах, чем при отрицательных. Так, при 25 и 50 °С – изменения $|S_{21}|$ более 1 дБ. С ростом температуры с 50 до 100 °С $|S_{21}|$ существенно изменяется (свыше 3 ГГц), а на частотных зависимостях появляются более частые осцилляции $|S_{21}|$. Минимум $|S_{21}|$ при $T = 75$ °С составляет -11 дБ и -14 дБ при $T = 100$ °С (на частотах 4–5 ГГц). Охлаждение воды до $T = 0$ °С повышает $|S_{21}|$ до -8 дБ, при $T = -25$ °С – до -3 дБ, тогда как при $T = -50$ °С до -2 дБ. Это показывает, что температура сильно влияет на $|S_{21}|$. В результате отрицательные температуры минимально влияют на $|S_{21}|$, а при положительных температурах $|S_{21}|$ снижается. При этом, чем выше температура, тем

меньше разница по частоте между узлами и пучностями на частотных зависимостях $|S_{21}|$.

Вычисление уровня вносимых потерь

На основе измеренных частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой в контейнере 5 мл вычислены ВП водой при различных температурах (1) и интерполированы полиномом 4-й степени (рисунок 5). Температура существенно влияет на ВП. Так, при 25–100 °С и с ростом частоты значение ВП растет до 10 дБ. При уменьшении температуры до 0 °С максимум ВП снижается до 8 дБ, а при температуре -25 и -50 °С – до 3 и 2 дБ, соответственно.

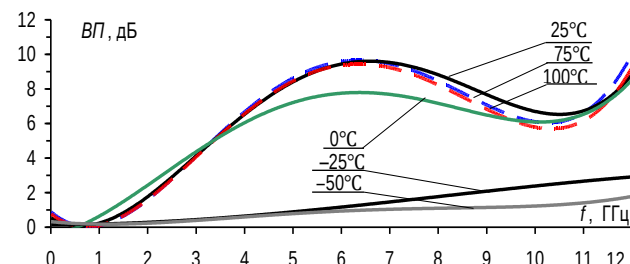


Рис. 5. Частотные зависимости ВП при разных температурах воды

Fig. 5. Frequency Dependences of Insertion Loss (IL) at Different Water Temperatures

Низкий уровень ВП (см. рисунок 5) связан с тем, что при отрицательных температурах вода переходит в твердое агрегатное состояние, что значительно изменяет ее электрофизические параметры (σ и ϵ_r).

Вычисление удельной электропроводности воды

Вычислены по (1–3) частотные зависимости σ (рисунок 6а) и аппроксимированы полиномом 4-й степени (рисунок 6б). Полученные частотные зависимости σ воды сравнены со значениями из [21, 22], измеренными при $T = 25$ °С до частоты 7 ГГц.

Из рисунка 6а видно, как температура влияет на частотную зависимость σ . Так, максимум σ составляет 12 См/м при $T = 100$ °С на частоте 4,9 ГГц, а минимум – $\sigma \approx 1$ См/м при $T = -50$ °С на частоте 12 ГГц. При аппроксимации зависимостей σ можно заметить (см. рисунок 6б), что они близки по поведению к зависимостям из [21, 22] до 6 ГГц. Так, σ увеличивается до 6,5 См/м при $T = 25$ °С с ростом частоты до 7 ГГц, а при $T = 0$ °С – до 4,8 См/м. Свыше 6 ГГц наблюдается незначительный спад, а затем рост σ . Отрицательные температуры: -25 и -50 °С незначительно его увеличивают до 1,3 и 0,8 См/м, соответственно. Разница значений σ составляет 1 См/м в диапазоне температур от 25 до 100 °С, и увеличивается до 1,8 См/м при температуре около 0 °С, а для отрицательных температур составляет 0,5 См/м.

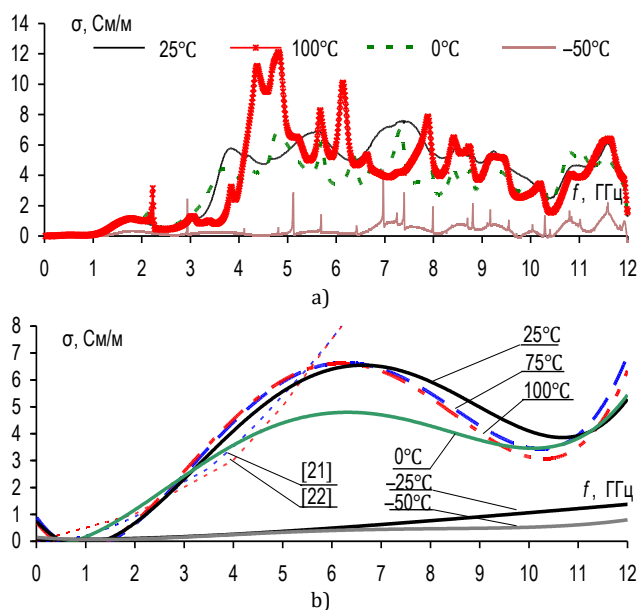


Рис. 6. Частотные зависимости σ без аппроксимации (а) и с ней (б) при изменении температуры от -50 до 100 °C воды в контейнере

Fig. 6. Frequency Dependences of σ without Approximation (a) and with it (b) at Temperature Change from -50 to 100 °C of Water in the Container

Влияние пленки воды на S -параметры микрополосковой линии передачи

Учет влияния воды на S -параметры МЛП может быть выполнен следующим образом:

- 1) измерить частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с водой, размещенной внутри контейнера в заданном диапазоне температур, например, от -50 до 100 °C;
- 2) вычислить частотные зависимости ВП и σ по выражениям (1–3);
- 3) создать геометрическую модель линии передачи;
- 4) создать геометрическую модель тонкой пленки с возможностью варьирования по толщине слоя;
- 5) учесть в геометрической модели пленки воды частотные зависимости σ при разных температурах;
- 6) используя численный метод, вычислить S -параметры линии передачи с учетом разных толщин и σ пленки воды;
- 7) проанализировать частотные зависимости S -параметров линии передачи с пленкой воды;
- 8) при необходимости добавить температурные зависимости электрофизических параметров проводника и диэлектрика линии передачи и повторить вычисления S -параметров;
- 9) принять меры по ослаблению влияния температуры и влажности на S -параметры линии передачи.

Используя предложенную выше методику, оценено влияние влажности на S -параметры микро-

полосковой линии передачи (МЛП). Для этого выбрана МЛП с $Z_0 = 50$ Ом и параметрами: $\epsilon_{r1} = 4,3$, $w = 3$ мм, $t_1 = 35$ мкм, $h_1 = 1,6$ мм и длиной 60 мм (рисунок 7). Температурные зависимости электрофизических параметров проводника и диэлектрика МЛП в данной работе не учитывались. МЛП покрывалась пленкой воды толщиной $h_2 = 1$ мм, имеющем электрофизические параметры модели дистиллированной ($\epsilon_r = 78,4$ и $\sigma = 5,6$ мкСм/м) и чистой воды ($\epsilon_r = 78$ и $\sigma = 1,59$ См/м). Также использовались частотная зависимость по модели Дебая со значениями ϵ_r в диапазоне от 78 до 58 и σ – от 0 до 25 См/м в диапазоне частот до 12 ГГц. Создана модель воды на основе измеренных и вычисленных значений σ (см. рисунок 6b) при $T = 25$ °C, а значение $\epsilon_r = 80$ было постоянным во всем диапазоне частот.

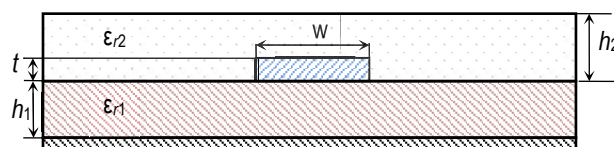


Рис. 7. Поперечное сечение МЛП со слоем воды

Fig. 7. Cross Section of the Microstrip Transmission Line (MTL) with a Water Layer

Используя полученные геометрические и электрические параметры МЛП без слоя и со слоем воды, вычислены частотные зависимости S -параметров (рисунок 8) методом конечных элементов (МКЭ). Пленка воды на поверхности МЛП значительно влияет на S -параметры.

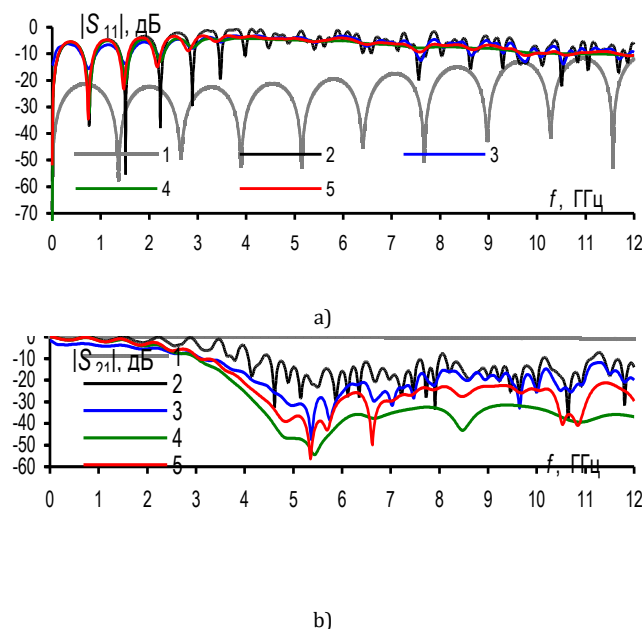


Рис. 8. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) МЛП без (1) и со слоем дистиллированной (2) и чистой (3) воды, с использованием моделей Дебая (4) и на основе ВП (5)

Fig. 8. Frequency Dependences of $|S_{11}|$ (a) and $|S_{21}|$ (b) of the MTL without (1) and with a Layer of Distilled (2) and Pure (3) Water, Debye (4) and Using IL-Based (5) Models

Так, если без воды $|S_{11}| < -20$ дБ до частоты 6 ГГц, то с водой $|S_{11}| < -2$ дБ, что приводит к рас-согласованию МЛП на всех частотах при наличии на ней воды. Видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ без воды изменяется от 0 до $-1,2$ дБ, тогда как с водой – от 0 до -58 дБ.

Использование разных моделей воды различно влияет на S -параметры МЛП. Так, до 3 ГГц $\Delta|S_{21}|$ может составлять 5 дБ, тогда как в диапазоне 6,5–12 ГГц достигает 30 дБ, что подтверждает необходимость в использовании корректной модели воды на этапе проектирования МЛП и ПП в целом. Например, значения S -параметров для дистиллированной воды, затем чистой воды, далее созданной модели воды и модели по Дебаю отличаются. В результате можно предположить, что, чем больше σ воды, тем меньше $|S_{21}|$. Наибольшее отличие S -параметров МЛП с водой получено по модели Дебая. Поэтому выполнена оценка влияния толщины слоя воды при использовании модели Дебая и экспериментальной модели воды.

Моделировались частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной пленки воды (h_2): 1; 0,5; 0,35 мм, используя модели Дебая и экспериментальную (рисунок 9).

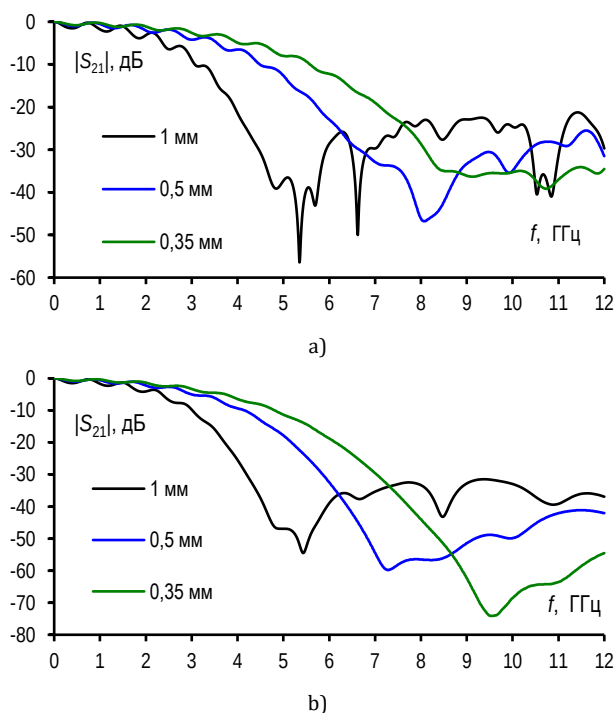


Рис. 9. Частотные зависимости $|S_{21}|$ МЛП с разной толщиной пленки воды, используя модели на основе ВП (а) и Дебая (б)

Fig. 9. Frequency Dependences of $|S_{21}|$ of the MTLs with Various Water Layer Thicknesses Obtained Using IL-Based (a) and Debye (b) Models

Модель на основе ВП показала, что при уменьшении h_2 от 1 до 0,35 мм минимумы $|S_{21}|$ повышаются от -56 до -39 дБ и растут по частоте с 5–6 до 10–11 ГГц (см. рисунок 9а). По модели Дебая минимумы значения $|S_{21}|$ уменьшаются от -53 до

-74 дБ и растут по частоте с 5–6 до 9–10 ГГц (см. рисунок 9б).

В результате модель Дебая оказывает большее влияние на $|S_{21}|$, по сравнению с моделью воды на основе ВП, что может быть связано с высоким значением σ у модели Дебая по сравнению с другими моделями. Толщина пленки воды влияет на $|S_{21}|$ как по амплитуде, так и по частоте, и чем она больше, тем частота среза меньше, а крутизна $|S_{21}|$ выше. Так, при увеличении толщины пленки воды от 0,35 до 1 мм частота среза смещается с 3 до 1,7 ГГц, что приводит к необходимости герметизировать устройства СВЧ в РЭА или учитывать влияние влажности при проектировании, например, заменив несимметричную на симметричную МЛП.

Влияние пленки льда на S -параметры микрополосковой линии передачи

Отрицательная температура окружающей среды образует из воды лед, что иначе влияет на S -параметры МЛП и электрические характеристики ПП в целом. Кроме того, конденсируемая вода на ПП может содержать разные примеси, что оказывает влияние на модель воды. При моделировании предполагается, что для моделей значение ϵ_2 не изменяется и составляет 3,2 во всем диапазоне частот, а значения σ различны для моделей чистого ($\sigma = 0$ См/м) и электропроводящего ($\sigma = 1$ См/м) льда и не зависят от частоты. На основе вычисленных по ВП значений σ воды при $T = -50$ °С (см. рисунок 6б) создана модель для льда. Используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров разных моделей льда при его толщине $h_2 = 1$ мм (рисунок 10). Значения $|S_{11}|$ вне зависимости от модели льда больше уровня в -20 дБ, тем самым лед влияет на электрические характеристики МЛП. С ростом частоты $|S_{21}|$ уменьшается вне зависимости от модели воды (рисунок 10б). Разница значений между МЛП и с учетом пленки чистого и на основе ВП льда составляет -1 дБ, а с пленкой электропроводящего льда – от 1 до 12 дБ. В результате пленка чистого льда минимально влияет на $|S_{21}|$ МЛП.

Моделировались частотные зависимости $|S_{21}|$ для разных моделей льда (рисунок 11) при изменении h_2 : 1; 0,5; 0,35 мм), используя МКЭ. Толщина льда на МЛП, не зависимо от модели, влияет на минимум значения $|S_{21}|$. Для всех моделей льда есть разница между значениями $|S_{21}|$, например, при толщине льда 1 и 0,5 мм она составляет от 0,2 до 3 дБ, тогда как для 0,5 и 0,35 мм – от 0,1 до 1 дБ. Для модели чистого льда при толщине 1 мм с ростом частоты $|S_{21}|$ уменьшается, но добавляются дополнительные осцилляции. При этом с ростом частоты амплитуда осцилляций увеличивается.

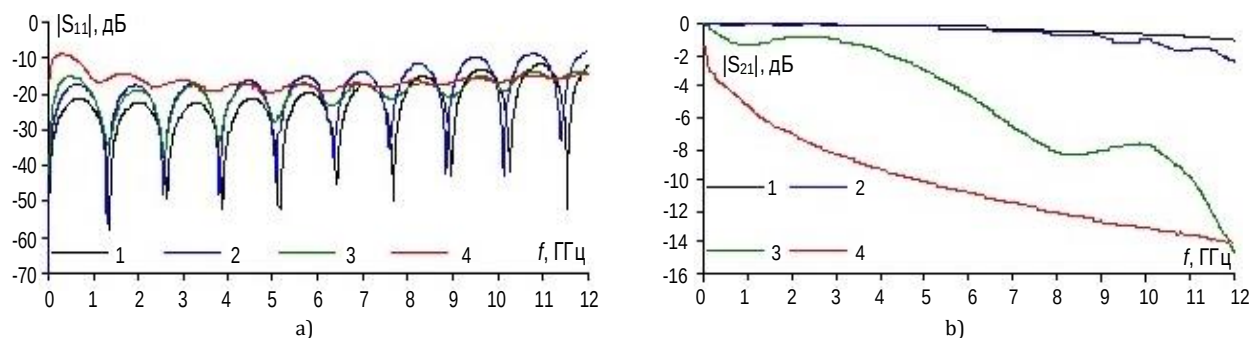


Рис. 10. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) МЛП (1) с использованием моделей чистого (2), на основе ВП (3) и электропроводящего (4) льда

Fig. 10. Frequency Dependences of $|S_{11}|$ (a) and $|S_{21}|$ (b) of the MTL (1) Using Pure (2), IL-Based (3), and Electrically Conductive (4) Ice Models

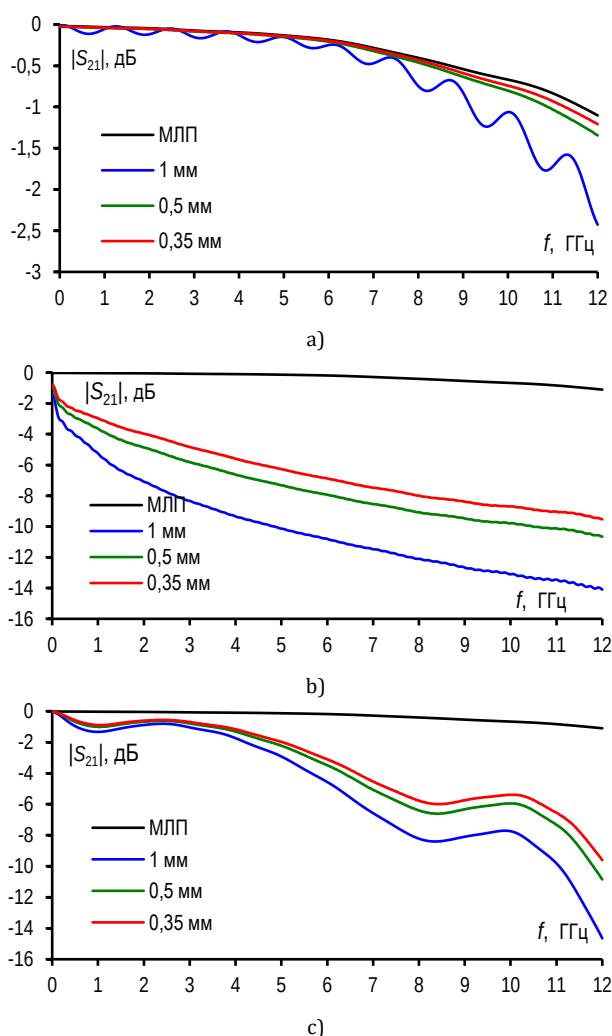


Рис. 11. Частотные зависимости $|S_{21}|$ МЛП с использованием моделей чистого (а), электропроводящего (б) и на основе ВП (с) льда разной толщины

Fig. 11. Frequency Dependences of $|S_{21}|$ of the MTLs Obtained Using Pure (a), Electrically Conductive (b), and Experimental (c) Ice Models of Varying Thickness

Выявлено, что для модели МЛП с пленкой чистого льда изменения $|S_{21}|$ не превышают 3 дБ. Тогда как для модели на основе (3) увеличение

пленки льда – от 0,35 до 1 мм, смещает с 6 до 5,1 ГГц частоту среза, а для модели электропроводящего льда – с 1 до 0,2 ГГц. В результате повышенная концентрация химических веществ с влажностью в окружающей среде и при резком снижении температуры может привести к появлению льда с высокой электропроводностью на поверхности МЛП, что приведет к ослаблению (≥ 3 дБ) в ней сигналов на частотах свыше 200 МГц.

Заключение

В результате представлена методика для учета воздействия температуры и влажности на электрические характеристики линии передачи на ПП, позволяющая оценить изменение ее S -параметров в широких диапазонах частот, влажности и температуры воздуха с учетом химического состава окружающей среды, что в дальнейшем позволит при проектировании ПП оценить устойчивость приемопередающих устройств к дестабилизирующему воздействию. Для этих целей измерены S -параметры воды в диапазонах частот от 10 МГц до 12 ГГц и температур от -50 до 100 °С. Показано, что температура существенно влияет на частотные зависимости S -параметров воды при ее нагреве до 100 °С и охлаждении до -50 °С. Выявлено, что с ростом температуры растут ВП, а при отрицательной температуре они уменьшаются. Модель для вычисления σ воды на основе измеренных S -параметров отличается вычислением уровня ВП воды в коаксиальной камере при изменении ее температуры. Разница с известными значениями σ не превышает при отрицательных температурах 0,5 См/м, а при положительных – 1,8 См/м. Высокая разница σ может быть связана с недостатком предлагаемой модели, что в дальнейшем будет более детально экспериментально исследовано на ПП, покрытых водой и льдом. Из этих данных созданы электрические модели для воды и льда, что позволило смоделировать влияние климатических факторов среды на электрические характеристики МЛП. Оценено влияние толщины слоя воды на S -

параметры МЛП. Используя коаксиальную камеру с более высокой граничной частотой, могут быть созданы приближенные электрические модели воды и льда с различными примесями, например, для морской воды.

Таким образом, представлены модели и методика для учета воздействия температуры и влажности воздуха на электрические характеристики МЛП, что позволит оценить изменение параметров сигналов РЭА в широких диапазонах частот,

температур, влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды. Используя измеренные S -параметры и метод векторной подгонки (вектор Фиттинг), могут быть получены схемотехнические параметры воды с учетом ее температуры, необходимые для вычисления электрических характеристик различных линий передачи при их проектировании для заданных климатических условий эксплуатации, что будет сделано в дальнейшем.

Список источников

1. Zhou Y., Lang R.H., Dinnat E.P., Le Vine David M. Seawater Debye Model Function at L-Band and its Impact on Salinity Retrieval from Aquarius Satellite Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Vol. 59. Iss. 10. PP. 8103–8116. DOI:10.1109/TGRS.2020.3045771
2. Onibonoje M.O. A distributed control wireless system for environmental humidity determination based on adaptive controller model // Scientific African. 2021. Vol. 13. PP. 1–8. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00922
3. Conseil-Gudla H., Staliulionis Z., Jellesen M.S., Jabbari M., Hattel J.H., Ambat R. Humidity Buildup in Electronic Enclosures Exposed to Constant Conditions // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. Iss. 3. PP. 412–423. DOI:10.1109/TCPMT.2017.2655447
4. Ambat R., Conseil-Gudla H. Improving intrinsic corrosion reliability of printed circuit board assembly // Proceedings of the 18th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC, Singapore, 30 November – 03 December 2016). IEEE, 2016. PP. 540–544. DOI:10.1109/EPTC.2016.7861538
5. Суппа М., Кузнецова Т. Методика исследования и испытаний влагозащитных покрытий, паяльных паст и технологических процессов // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 7(75). С. 78–82. EDN:SZSYXB
6. Jacobsen J.B., Krog J.P., Rimestad L., Riis A., Holm A.H. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications // IMAPS Nordic. 2012. Vol. 536. Iss. 6986. PP. 1–8.
7. Wang H., Liserre M., Blaabjerg F. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013. Vol. 7. Iss. 2. PP. 17–26. DOI:10.1109/MIE.2013.2252958
8. Artemov V. The Dielectric Properties and Dynamic Structure of Water and Ice // The Electrodynamics of Water and Ice. Springer Series in Chemical Physics. Cham: Springer, 2021. Vol. 124. PP. 131–169. DOI:10.1007/978-3-030-72424-5_4
9. Zhao L., Ma K., Yang Z. Changes of Water Hydrogen Bond Network with Different Externalities // International Journal of Molecular Sciences. 2015. Vol. 16. Iss. 4. PP. 8454–8489. DOI:10.3390/ijms16048454
10. Kozak R., Khorsand K., Zarifi T., Golovin K., Zarifi M.H. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Iss. 1. PP. 1–11. DOI:10.1038/s41598-021-93082-2
11. Schoenlinner B., Steinmayer M., Schulte B. Cabin ceiling-integrated broadband antenna for wireless services in passenger aircraft // Proceedings of the 42nd European Microwave Conference (Amsterdam, Netherlands, 29 October – 01 November 2012). IEEE, 2012. PP. 846–849. DOI:10.23919/EuMC.2012.6459217
12. Ley S., Schilling S., Fiser O., Vrba J., Sachs J., Helbig M. Ultra-wideband Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy of Porcine Tissue and Blood in the Microwave Frequency Range // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 7. PP. 1–21. DOI:10.3390/s19071707
13. Gregory A.P., Quéléver K., Allal D., Jawad O. Validation of a Broadband Tissue-Equivalent Liquid for SAR Measurement and Monitoring of its Dielectric Properties for Use in a Sealed Phantom // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 10. PP. 1–13. DOI:10.3390/s20102956
14. Lun'kov A.E., Kovalev D.G. Dispersion of Water Conductivity in the Frequency Range of 10^4 – 10^6 Hz // Russian Journal of Electrochemistry. 2019. Vol. 55. PP. 1246–1250. DOI:10.1134/S1023193519120103
15. Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Zhuravlev A.V., Korovin E.Yu. Analysis of Dielectric Spectra of Water with Conductive Impurities in a Wide Frequency Range // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 60. PP. 1893–1900. DOI:10.1007/s11182-018-1299-4
16. Water Structure and Science. URL: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html (Accessed 21.01.2024)
17. Wilson P.F., Ma M.T., Adams J.W. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far-field source simulation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1988. Vol. 30. Iss. 3. PP. 239–250. DOI:10.1109/15.3302
18. Wilson P.F., Ma M.T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. NBS technical note № 1095. Washington: U.S. Government Printing Office, 1986. 66 p.
19. Неужин В.Н., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Анализ электрических параметров жидкостей в коаксиальной камере при изменении температуры // Ural Radio Engineering Journal. 2023. Т. 7. № 1. С. 37–55. DOI:10.15826/urej.2023.7.1.003. EDN:UJYZTS
20. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. PP. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012077
21. Database Summary // IT IS FOUNDATION. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary> (Accessed 21.01.2024)
22. Vidjak K., Hessinger C., Cavagnaro M. Broadband Dielectric Spectroscopy with a Microwave Ablation Antenna // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 5. PP. 1–21. DOI:10.3390/s23052579

References

1. Zhou Y., Lang R.H., Dinnat E.P., Le Vine David M. Seawater Debye Model Function at L-Band and its Impact on Salinity Retrieval from Aquarius Satellite Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021;59(10):8103–8116. DOI:10.1109/TGRS.2020.3045771
2. Onibonoje M.O. A distributed control wireless system for environmental humidity determination based on adaptive controller model. *Scientific African*. 2021;13:1–8. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00922
3. Conseil-Gudla H., Staliulionis Z., Jellesen M.S., Jabbari M., Hattel J.H., Ambat R. Humidity Buildup in Electronic Enclosures Exposed to Constant Conditions. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2017;7(3):412–423. DOI:10.1109/TCPMT.2017.2655447
4. Ambat R., Conseil-Gudla H. Improving intrinsic corrosion reliability of printed circuit board assembly. *Proceedings of the 18th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC, 30 November – 03 December 2016, Singapore*. IEEE; 2016. p.540–544. DOI:10.1109/EPTC.2016.7861538
5. Suppa M., Kuznetsova M. Research and testing methods for moisture barrier coatings, solder pastes and processes. *Technologies in the electronics industry*. 2014;7(75):34–46. (in Russ.). EDN:SZSYXB
6. Jacobsen J.B., Krog J.P., Rimestad L., Riis A., Holm A.H. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications. *IMAPS Nordic*. 2012;536(6986):1–8.
7. Wang H., Liserre M., Blaabjerg F. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2013;7(2):17–26. DOI:10.1109/MIE.2013.2252958
8. Artemov V. The Dielectric Properties and Dynamic Structure of Water and Ice. In: *The Electrodynamics of Water and Ice. Springer Series in Chemical Physics, vol.124*. Cham: Springer; 2021. p.131–169. DOI:10.1007/978-3-030-72424-5_4
9. Zhao L., Ma K., Yang Z. Changes of Water Hydrogen Bond Network with Different Externalities. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015;16(4):8454–8489. DOI:10.3390/ijms16048454
10. Kozak R., Khorsand K., Zarifi T., Golovin K., Zarifi M.H. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection. *Scientific Reports*. 2021;11(1):1–11. DOI:10.1038/s41598-021-93082-2
11. Schoenlinner B., Steinmayer M., Schulte B. Cabin ceiling-integrated broadband antenna for wireless services in passenger aircraft. *Proceedings of the 42nd European Microwave Conference, 29 October – 01 November 2012, Amsterdam, Netherlands*. IEEE; 2012. p.846–849. DOI:10.23919/EuMC.2012.6459217
12. Ley S., Schilling S., Fiser O., Vrba J., Sachs J., Helbig M. Ultra-wideband Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy of Porcine Tissue and Blood in the Microwave Frequency Range. *Sensors*. 2019;19(7):1–21. DOI:10.3390/s19071707
13. Gregory A.P., Quéléver K., Allal D., Jawad O. Validation of a Broadband Tissue-Equivalent Liquid for SAR Measurement and Monitoring of its Dielectric Properties for Use in a Sealed Phantom. *Sensors*. 2020;20(10):1–13. DOI:10.3390/s20102956
14. Lun'kov A.E., Kovalev D.G. Dispersion of Water Conductivity in the Frequency Range of 10^4 – 10^6 Hz. *Russian Journal of Electrochemistry* 2019;55:1246–1250. DOI:10.1134/S1023193519120103
15. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I., Zhuravlev A.V., Korovin E.Yu. Analysis of Dielectric Spectra of Water with Conductive Impurities in a Wide Frequency Range. *Russian Physics Journal*. 2018;60:1893–1900. DOI:10.1007/s11182-018-1299-4
16. *Water Structure and Science*. URL: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html [Accessed 21.01.2024]
17. Wilson P.F., Ma M.T., Adams J.W. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far-field source simulation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1988;30(3):239–250. DOI:10.1109/15.3302
18. Wilson P.F., Ma M.T. *A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials*. NBS technical note № 1095. Washington: U.S. Government Printing Office; 1986. 66 p.
19. Nevezhin V.N., Busygina A.V., Komnatnov M.E. Analysis of electrical parameters of liquids in a coaxial cell at varying temperatures. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(1):37–55. (in Russ.). DOI:10.15826/urej.2023.7.1.003. EDN:UJYZTS
20. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;734(1):1–6. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012077
21. *IT IS FOUNDATION*. Database Summary. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary> [Accessed 21.01.2024]
22. Vidjak K., Hessinger C., Cavagnaro M. Broadband Dielectric Spectroscopy with a Microwave Ablation Antenna. *Sensors*. 2023;23(5):1–21. DOI:10.3390/s23052579

Статья поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена после рецензирования 09.08.2024; принята к публикации 20.09.2024.

The article was submitted 18.07.2024; approved after reviewing 09.08.2024; accepted for publication 20.09.2024.

Информация об авторах:

НЕВЕЖИН
Виталий Николаевич

аспирант кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
 <https://orcid.org/0000-0002-2257-7690>

КОМНАТНОВ
Максим Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
 <https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 519.872, 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-34-42>

Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи

Альбина Владимировна Помогалова, pomogalova.av@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность предлагаемых в работе подходов и решений обусловлена стремлением к распределенным вычислениям и децентрализации модулей систем с помощью технологии блокчейн с целью повышения автономности, безопасности и независимости компонентов системы. Внедрение технологии блокчейн для децентрализации затрудняется отсутствием гибкости с точки зрения алгоритма принятия единого решения в системе – консенсуса, влияющего на количество генерируемого сетевого трафика и требованиям к аппаратной составляющей. В связи с меняющимся характером передаваемого трафика, загруженности канала связи, времени суток передачи трафика, оборудования, используемых сетевых протоколов разработка единого универсального алгоритма консенсуса не является возможной, так как зависит от очень широкого ряда изменяемых и специфичных параметров, характерных для разных задач. Внесение механизмов адаптации к текущим сетевым условиям и изменение алгоритма консенсуса без потери информации и с удовлетворяющим уровнем задержек позволило бы обеспечить достаточную гибкость для дальнейшего внедрения в существующие телекоммуникационные системы.

Целью настоящей работы является оценка эффективности предлагаемого адаптивного алгоритма выбора консенсуса блокчейн-сетей. Его сущность заключается в смене алгоритма консенсуса на участке сети связи блокчейн-сети при достижении определенных условий, позволяющий регулировать количество генерируемой нагрузки на сеть связи для снижения потерь блоков транзакций и последующей задержки их обработки.

Предложенная модель оценки эффективности базируется на **методах** математического моделирования, анализе дифференциальных уравнений, теории массового обслуживания и сетевых графов. Анализ **результатов** показал эффективность предложенной модели при сравнении результатов аналитического расчета и проведенного эксперимента.

Научная новизна заключается в предлагаемом подходе разработки адаптивного алгоритма выбора консенсуса, в отличие от разработки универсального алгоритма консенсуса, и модели оценки эффективности предлагаемого подхода на сети связи с учетом ряда параметров, характеризующих устройства и участок сети связи.

Теоретическая значимость заключается в универсальности предлагаемой модели оценки эффективности для расчета скорости синхронизации всех узлов блокчейн-сети при задаваемых сетевых параметрах.

Практическая значимость предложенного алгоритма и метода оценки эффективности заключается в формировании новых подходов и возможностей при интеграции технологии блокчейн в современные сети связи, абстрагируя от проблематики подбора консенсуса в изменяющихся условиях участка сети связи.

Ключевые слова: блокчейн, алгоритм консенсуса, адаптивный алгоритм выбора консенсуса, эффективность, модель оценки эффективности, TRP

Ссылка для цитирования: Помогалова А.В. Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 34–42. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54. EDN:VOXXAK

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-34-42>

The Efficiency Assessment of the Blockchain Networks Adaptive Algorithm as Part of a Multi-Consensus System on Communication Networks

 Albina V. Pomogalova, pomogalova.av@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

*The relevance of the approaches and solutions proposed in the work is due to the desire for distributed computing and decentralization of system modules using blockchain technology in order to increase the autonomy, security and independence of system components. The implementation of blockchain technology for decentralization is hampered by the lack of flexibility in terms of the algorithm for making a single decision in the asynchronous system – consensus, which affects the amount of generated network traffic and the requirements for the hardware component. Due to the changing nature of the transmitted traffic, the load on the communication channel, the time of day of traffic transmission, the equipment, and the network protocols used, the development of a single universal consensus algorithm is not possible, since it depends on a very wide range of variable and specific parameters characteristic of different tasks. The introduction of adaptation mechanisms to current network conditions and a change in the consensus algorithm without losing information and with a satisfactory level of delays would provide sufficient flexibility for further implementation in existing telecommunication systems. **The purpose** of this paper is to evaluate the effectiveness of the proposed adaptive algorithm for choosing a consensus for blockchain networks.*

***The essence** of the presented algorithm is to change the consensus algorithm on a section of the blockchain network upon reaching certain network conditions, which allows regulating the amount of generated load on the communication network to reduce the loss of transaction blocks and the subsequent delay in their processing. The proposed efficiency assessment model is based on mathematical modeling methods, differential equation analysis, queueing theory and network graphs. The analysis of the results showed the efficiency of the proposed model when comparing the results of the analytical calculation and the experiment. **The scientific novelty** of the proposed approach is to developing an adaptive consensus selection algorithm, as opposed to developing a universal consensus algorithm, and the efficiency assessment model of the proposed algorithm on the communication network, taking into account a number of parameters characterizing the devices and the section of the communication network.*

***The theoretical significance** is in the universality of the proposed efficiency assessment model for calculating the synchronization speed of all nodes of the blockchain network with specified network parameters.*

***The practical significance** of the proposed algorithm and efficiency assessment method lies in the formation of new approaches and opportunities for integrating blockchain technology into modern communication networks, abstracting from the problem of consensus selection in changing conditions of the communication network section.*

Keywords: blockchain, consensus algorithm, adaptive consensus selection algorithm, efficiency, efficiency evaluation model, DLT

For citation: Pomogalova A.V. The Efficiency Assessment of the Blockchain Networks Adaptive Algorithm as Part of a Multi-Consensus System on Communication Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):34–42. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54. EDN:VOXXAK

Введение

На сегодняшний день представлено множество работ, посвященных исследованиям в области взаимодействия с технологией блокчейн, интеграции в современные телекоммуникационные, гетеро-

генные сети. В работах рассматриваются проблемы сетевого характера, аспекты безопасности в блокчейн-сетях [1], форматов данных, способах оптимизации и ускорения блокчейн-сетей [2–4]. К проблемам, влияющим на интеграцию решений на основе

распределенного реестра и технологии блокчейн, как частного случая, можно отнести низкую пропускную способность, задержку транзакций, отсутствие гарантий доставки, асинхронность, вычислительные ресурсы, энергопотребление.

Многие из обозначенных проблем могут быть решены с помощью корректно подобранного алгоритма консенсуса и правил сети [1], которые включают в себя:

- размер транзакции;
- размер блока;
- частоту выпуска блоков транзакций;
- порядок создания блока;
- способ проверки корректности блока и соответствия правилам сети.

Совокупность правил сети и алгоритма консенсуса позволяют достаточно гибко масштабировать систему, адаптировать под сетевые условия в некоторый момент времени T . На сегодняшний день исследователями и разработчиками представлено более 30 вариаций алгоритмов консенсуса, каждый из которых отлично проявляет себя при определенных сетевых условиях, что, к сожалению, не решает проблемы для сетей передачи данных в целом, а может быть решением для частных, конкретных кейсов [3].

Но если речь идет о современных телекоммуникационных сетях связи, где частота передаваемых сетевых пакетов постоянно меняется и зависит от множества факторов (время суток, праздничные дни, район, регион, мировые события), где помимо пользовательской активности, может присутствовать понятие приоритетного трафика, то подбор универсального алгоритма консенсуса становится крайне многокритериальной задачей [5]. Если же речь идет о, например, интеллектуальных транспортных сетях связи, то дополнительным фактором является изменчивость аппаратного обеспечения инфраструктуры участка связи (центр города снабжен более современными устройствами с более широкой площадью покрытия в сравнении с удаленной трассой в регионах).

Однако, если бы система узлов блокчейн-сети могла реагировать на изменения сетевого характера, учитывать их и при наступлении определенных условий менять правила сети и алгоритм консенсуса до последующих изменений, то это позволило бы снизить зависимость от аппаратного обеспечения и предоставить достаточный уровень гибкости при интеграции технологии блокчейн [5, 6]. Поиск единого универсального алгоритма консенсуса является не самым лучшим решением в случае современных сетей передачи данных. Это обусловлено меняющимся характером трафика, аппаратным и программным обеспечением. Так, какие-то сети более чувствительны к задержкам и большим

объемам данных, в других – аппаратная составляющая стандартизирована и всегда обладает одинаковым набором параметров и мощностью [6, 7]. Наиболее верным решением будет создание адаптивного алгоритма выбора консенсуса в системе, позволяющего выбирать наиболее подходящий алгоритм консенсуса в момент времени T при текущих условиях окружающей системы, который можно назвать одним из ключевых компонентов мультиконсенсуса.

Гетерогенная сеть строится из подсетей, работающих в разных стандартах, по разным технологиям. При этом все они образуют единую интегрированную среду, где обеспечен бесшовный, незаметный для пользователя переход из одной подсети в другую. То есть, гетерогенная сеть функционирует как единая система. Интеграция технологии блокчейн в современные телекоммуникационные сети должна отвечать требованиям к гетерогенной сети [8]. Так, мультиконсенсусная блокчейн-сеть является аналогом гетерогенной сети связи в контексте технологии блокчейн, где в зависимости от сетевых характеристик или аппаратного обеспечения происходит выбор алгоритма консенсуса для участка сети. Последний, в свою очередь, совместно образует единую сеть передачи информации и распространения блоков данных (рисунок 1) для уязвимых участников дорожного движения (VRU, аббр. от англ. Vulnerable Road Users), устройств, установленных в транспортном средстве (OBU, аббр. от англ. On-Board Unit) и устройств, установленных на дорожной инфраструктуре (RSU, аббр. от англ. Roadside Unit).

Адаптивный алгоритм выбора консенсуса

Неотъемлемым компонентом рассматриваемой концепции является адаптивный алгоритм выбора алгоритма консенсуса в зависимости от сетевых условий [9], который позволяет корректировать такие характеристики информационных потоков блокчейн, как:

- максимальный или минимальный размер блока;
- максимальный или минимальный размер транзакции;
- частоту появления новых блоков в сети (сложность);
- правила построения блока и его валидации.

Принцип работы адаптивного алгоритма представлен в виде блок-схемы на рисунке 2. Каждый узел блокчейн-сети обладает собственным модулем оценки сетевых характеристик в момент времени T , для принятия решения о смене алгоритма консенсуса и корректировки параметров формирования новых блоков данных.

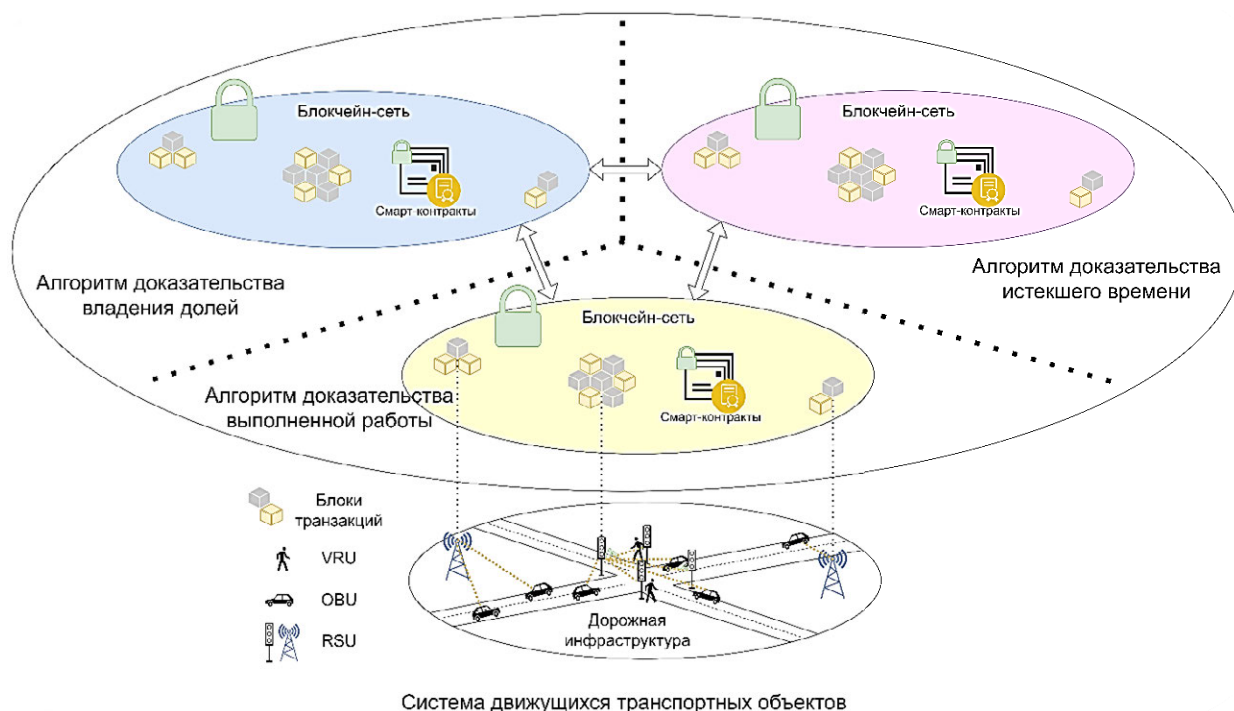


Рис. 1. Пример мультиконсенсусной блокчейн-сети для интеллектуальной транспортной системы
Fig. 1. An Example of a Multi-Consensus Blockchain Network for an Intelligent Transportation System

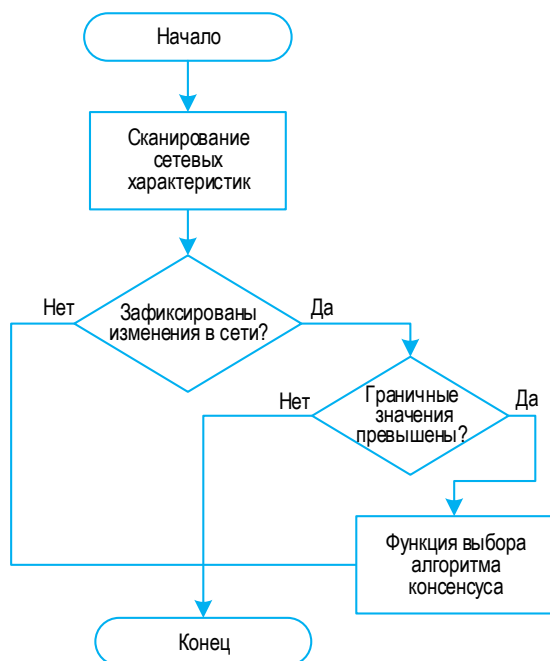


Рис. 2. Блок-схема адаптивного алгоритма выбора консенсуса на основе данных изменения сетевых характеристик
Fig. 2. Block Diagram of an Adaptive Consensus Selection Algorithm Based on Network Characteristic Change Data

Далее, информация об обновлении правил создания и валидации блоков распространяется от узла к другим узлам с целью смены общего алгоритма консенсуса в сети. Этот процесс делится на несколько этапов передачи информации, что напрямую зависит от количества связей узла. На рисунке

3 представлена общая схема сценария изменения алгоритма консенсуса в связи с изменением сетевых параметров. Как можно заметить, вторым этапом после обнаружения необходимости узлом сменить алгоритм консенсуса является передача сведений о смене. Первыми сообщением о смене консенсуса получают узлы, адреса которых знает исходный узел, с которым производится синхронизация данных. После получения информации эти узлы передают запрос на смену консенсуса далее.

Однако, эффективность данного подхода ограничена количеством устройств и их связей, количеством «уровней» передачи информации – чем меньше связей у узла сети, тем больше будет этапов передачи информации до границы сети (аналогично принципам систем с графами). Ограничение появляется в связи с функционированием сети во время смены алгоритма консенсуса, так как каждый узел продолжает работу по формированию блоков транзакций [10]. И распространение блока транзакций, сформированного на основе правил алгоритма консенсуса 1, не может быть проверено и добавлено в сеть узлом, чей активный алгоритм консенсуса при валидации отличается, что влечет за собой потерю блоков транзакций, и, как следствие, задержку в обработке транзакций [11].

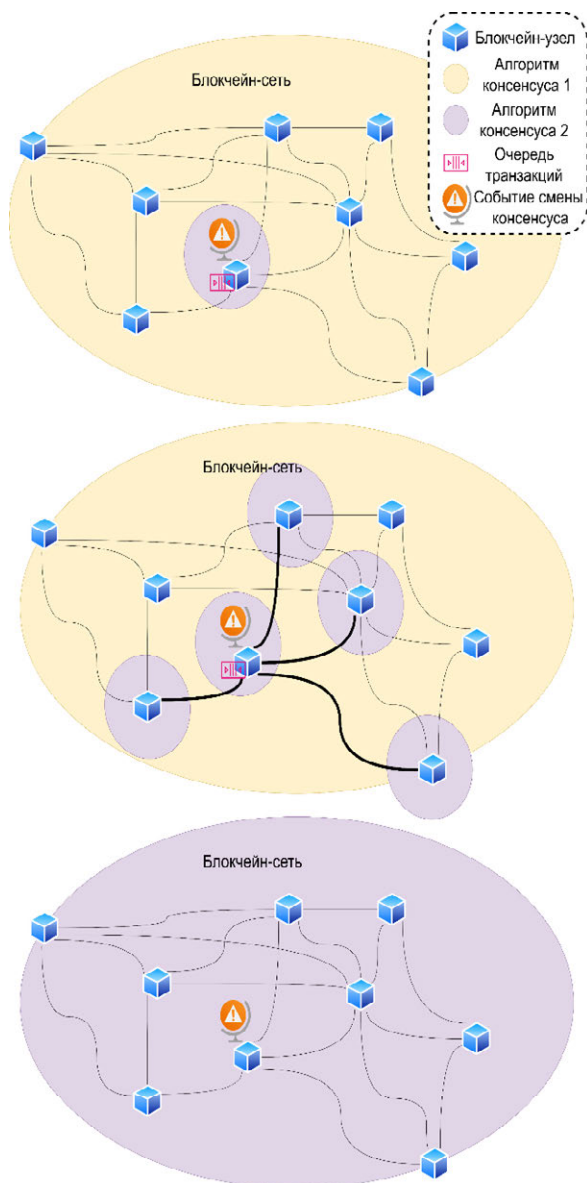


Рис. 3. Схема распространения информации о смене алгоритма консенсуса в сети устройств

Fig. 3. Scheme of Distribution of Information about Change of Consensus Algorithm in the Network of Devices

Расчет временных характеристик распространения информации по сети связи

Как можно заметить из приведенной схемы (см. рисунок 3), распространение блоков информации напоминает систему графов. Одной из важных характеристик графа является его диаметр $D(G)$, который определяет максимальное расстояние между любыми двумя узлами. Диаметр графа может быть использован для оценки времени полного распространения информации [12].

Для сетей с топологией малого мира (тип графа, в котором большинство узлов не являются соседями друг друга, но до большинства узлов можно добраться из любого другого с помощью небольшого числа переходов), например, в децентрализованных

системах диаметр графа $D(G)$ приблизительно равен $\log N$, где N — количество узлов в сети.

Если предположить, что каждое сообщение передается с фиксированной частотой c (обратная величина ко времени передачи сообщения τ_{ij} , где τ_{ij} — время передачи от узла i к узлу j), то время полного распространения информации по графу G можно оценить через диаметр:

$$T_{full} \approx \frac{D(G)}{c}, \quad (1)$$

где c — частота передачи сообщений между узлами; $D(G)$ — диаметр графа сети G (максимальное расстояние между узлами); T_{full} — время полного распространения информации о переключении алгоритма консенсуса по сети.

Во время периода T_{full} узлы, которые еще не получили информацию о переключении, продолжают генерировать блоки по старому алгоритму. Это может привести к конфликтам или форкам в блокчейне, что неизбежно ведет к потере блоков транзакций [11].

Пусть $P_{informed}(t)$ — доля узлов, получивших информацию к моменту времени t . Смоделируем распространение информации по экспоненциальной функции:

$$P_{informed}(t) = 1 - e^{-\beta t}, \quad (2)$$

где β — коэффициент скорости распространения информации, зависящий от c и топологии сети.

Доля узлов, не получивших информацию к моменту t , будет выглядеть следующим образом:

$$P_{uniform}(t) = e^{-\beta t}. \quad (3)$$

Поскольку процессы происходят в сетях с множеством узлов и зависят от большого количества случайных факторов, экспоненциальная функция помогает отразить вероятностные свойства систем и их динамику. С помощью полученных выражений для вычисления скорости распространения информации на основе графов можно представить модель для определения эффективности адаптивного алгоритма на сети связи.

Расчет эффективности адаптивного алгоритма для сети связи

Оценка эффективности адаптивного алгоритма напрямую зависит от количества создаваемых блоков, которые не будут утеряны в рамках смены алгоритма консенсуса.

Для оценки общего числа блоков, созданных по исходному алгоритму консенсуса B_{old} , необходимо вычислить интеграл (4), представляющий собой произведение количества узлов N , интенсивности генерации блоков λ и вероятности того, что узел

еще не получил информацию о переключении алгоритма консенсуса $P_{uninformed}$, в течение времени от

$t = 0$ до $t = T_{full}$ – полного времени переключения всех узлов сети.

$$B_{old} = N\lambda \int_0^{T_{full}} P_{uninformed}(t)dt = N\lambda \int_0^{T_{full}} e^{-\beta t} dt. \quad (4)$$

Выполнив преобразования, получим:

$$B_{old} = N\lambda \left(\frac{1 - e^{-\beta T_{full}}}{\beta} \right). \quad (5)$$

Если $\beta T_{full} \gg 1$, то $e^{-\beta T_{full}} \approx 0$, и тогда:

$$B_{old} \approx \frac{N\lambda}{\beta}. \quad (6)$$

В этом случае общее количество блоков, созданных всеми узлами за период времени T , составит:

$$B_{total} = N\lambda T, \quad (7)$$

где λ – средняя частота создания блоков узлом.

Разумно будет ввести понятие «полезных» блоков. Так как часть блоков, создаваемых во время смены консенсуса на сети, может быть утеряна, то абсолютно корректными с точки зрения гарантии принятия сетью можно считать блоки, созданные в сети, когда она полностью перешла на другой алгоритм консенсуса.

«Полезными» называют блоки, созданные после полного переключения на новый алгоритм консенсуса, то есть после времени T_{full} :

$$B_{useful} = N\lambda(T - T_{full}). \quad (8)$$

Эффективность адаптивного алгоритма η можно определить как отношение числа «полезных» блоков к общему числу созданных блоков:

$$\eta = \frac{B_{useful}}{B_{total}} = \frac{N\lambda(T - T_{full})}{N\lambda T} = 1 - \frac{T_{full}}{T}. \quad (9)$$

Выражение (9) демонстрирует, что эффективность уменьшается линейно с увеличением времени распространения информации T_{full} относительно общего времени T .

Учтем влияние количества узлов и скорости передачи данных и подставим выражение для T_{full} :

$$\eta = 1 - \frac{T_{full}}{T} = 1 - \frac{D(G)}{cT}. \quad (10)$$

При фиксированном T эффективность η зависит от:

- диаметра графа $D(G)$: чем больше диаметр, тем больше T_{full} и ниже эффективность;
- частоты передачи сообщений c : чем больше частота передачи, тем меньше T_{full} и выше эффективность.

Также необходимо учесть влияние скорости передачи транзакций на обработку и формирование блока, который затем распространяется по сети, уменьшая пропускную способность всего другого трафика канала связи.

Пусть частота создания транзакций λ_{tx} влияет на нагрузку сети и потенциально на время передачи сообщений, можно выразить c как функцию от λ_{tx} :

$$c = c_0 - k\lambda_{tx}, \quad (11)$$

где c_0 – базовая частота передачи при отсутствии транзакций; k – коэффициент, показывающий, как увеличение скорости транзакций уменьшает частоту передачи сообщений из-за сетевой загруженности.

Обобщенную математическую модель для оценки эффективности адаптивного алгоритма с учетом количества узлов N , скорости передачи данных c , скорости создания транзакций λ_{tx} и времени T можно представить в виде выражения:

$$\eta = 1 - \frac{D(G)}{(c_0 - k\lambda_{tx})T}. \quad (12)$$

Учтем, что диаметр графа $D(G)$ обычно зависит от количества узлов N . Для графов типа «малый мир» или случайных графов Эрдаша – Реньи принимает вид $D(G) \approx \log N$ и выражение эффективности адаптивного алгоритма примет вид:

$$\eta = 1 - \frac{\log N}{(c_0 - k\lambda_{tx})T}. \quad (13)$$

Теперь расширим модель, добавив в нее зависимость от времени генерации блоков T_{block} и размера блоков B_{size} с коэффициентом α для корректировки уровня влияния размера блока на сеть. Время генерации блоков и их размер – ключевые параметры, так как при активной генерации транзакций в сети начнет формироваться буфер (очередь), который в блокчейне называется mempool (сокр. mempool), влияющий на нагрузку сети и эффективность работы консенсуса [13].

С учетом обозначенных добавляемых параметров модель примет следующий вид:

$$\eta = 1 - \frac{D(G) * \alpha * B_{size}}{(c_0 - k\lambda_{tx}) * T * T_{block}}. \quad (14)$$

Исходя из выражений, представленных выше, можно заключить, что при увеличении:

- количества узлов N : эффективность η уменьшается логарифмически, так как увеличивается диаметр графа;
- частоты передачи c : эффективность η увеличивается, так как уменьшается время распространения информации;
- времени создания блока T_{block} : эффективность η увеличивается, так как уменьшается количество некорректно создаваемой информации;
- частоты создания транзакций λ_{tx} : эффективность η уменьшается, если λ_{tx} существенно влияет на c .

Апробация математической модели оценки эффективности адаптивного алгоритма

Финальный вид математической модели расчета эффективности адаптивного алгоритма представлен в выражении 14. Чтобы оценить корректности работы представленной модели проведем теоретический расчет и моделирование (таблица 1 и рисунок 4) для сравнения результатов [14].

В ходе экспериментального моделирования прием следующие параметры сети:

- количество узлов N : 100;
- диаметр графа $D(G)$: 4,6;
- частота передачи данных c_0 : 100 сообщений в секунду;
- размер блока B_{size} : 50 транзакций на блок;
- частота создания транзакций λ_{tx} : от 50 до 200 транзакций в секунду;
- время генерации блока T_{block} : от 10 до 50 секунд на блок;
- время наблюдения T : 200 секунд.

Количество узлов и диаметр графа постоянны на период всех теоретических и экспериментальных измерений и не представлены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные данные теоретических и экспериментальных расчетов

TABLE 1. Comparative Data of the Theoretical and Experimental Calculations

T_{block} (сек)	λ_{tx}	Эффективность η (%)		Отклонение (%)
		теоретическая	экспериментальная	
10	50	79,8	77,9	-1,9
20	50	82,5	81,2	-1,3
40	50	85,0	84,1	-0,9
50	50	86,2	85,4	-0,8
10	200	64,5	62,1	-2,4
20	200	67,3	65,8	-1,5
40	200	70,2	69,0	-1,2
50	200	72,1	71,3	-0,8

Примечание: λ_{tx} – частота создания транзакций (транзакций/сек)

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, меньшее время генерации блоков T_{block} (например, 10 секунд) приводит к значительному снижению эффективности, так как больше блоков генерируются и теряются до переключения алгоритма.

Во-вторых, с увеличением времени генерации блоков эффективность алгоритма повышается, что связано с меньшим количеством блоков, созданных по старому алгоритму.

В-третьих, с увеличением частоты создания транзакций λ_{tx} эффективность снижается, особенно при более высоких значениях λ_{tx} . Это связано с тем, что в блоке с высокой частотой создается большее количество транзакций, и, соответственно, больше из них теряется, если блок сгенерирован узлами, не перешедшими на новый алгоритм консенсуса.

В-четвертых, высокая частота создания транзакций существенно снижает эффективность сети, так как большее количество транзакций теряется до завершения процесса переключения алгоритма консенсуса.

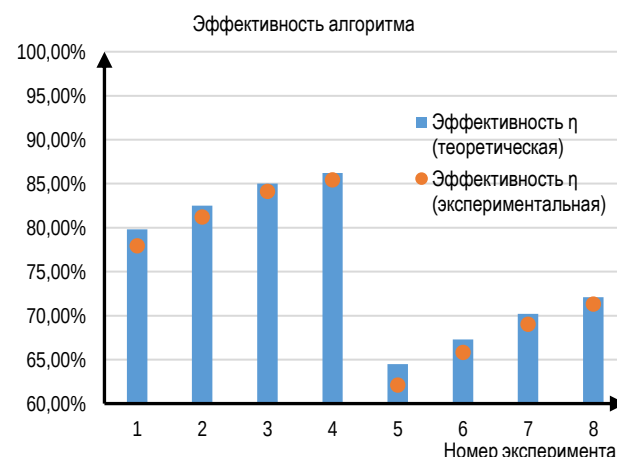


Рис. 4. Сравнительный график теоретических и экспериментальных расчетов

Fig. 4. Comparative Graph of Theoretical and Experimental Calculations

Заключение

В работе рассмотрена методика оценки эффективности адаптивного алгоритма переключения консенсуса в сети на основе математического моделирования, с учетом таких параметров, как время генерации блоков, размер блока (количество транзакций) и частота создания транзакций. Предложенная модель учитывает влияние указанных факторов на эффективность адаптивного алгоритма для участка сети при переключении между алгоритмами консенсуса, а также потери блоков, сгенерированных по старому алгоритму, до момента полного перехода сети на новый консенсус.

Показано, что разработанная модель позволяет точно оценить потери транзакций и блоков в зависимости от времени генерации блока и скорости создания транзакций. Приведены примеры, демонстрирующие, что увеличение времени генерации блока и уменьшение скорости создания транзакций способствует повышению эффективности адаптивного алгоритма для участка сети. Экспериментальные данные подтвердили, что предложенная модель достаточно точно позволяет оценить

эффективность адаптивного алгоритма для участка сети, при этом отклонение от теоретических расчетов не превышает 2–3 %. Таким образом, предложенный подход позволяет получить оценку эффективности адаптивного алгоритма для участка сети при переключении алгоритмов консенсуса с высокой точностью, что может быть использовано для дальнейшей оптимизации сетевых параметров и улучшения работы сетей связи при интеграции технологии блокчейн.

Список источников

1. Бахвалова Е.А., Судаков В.А. Исследование алгоритмов консенсуса для блокчейн-платформ // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 26. 16 с. DOI:10.20948/prepr-2021-26
2. Багдасарян К.М., Еремин В.Д. Теоретические аспекты развития криптоэкономики и перспективы использования технологии блокчейн в финансовом секторе // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 1. С. 21. EDN:SLAEMB
3. Вербицкий А.С., Барсуков Н.М. Предназначение и подходы к созданию интеллектуальных систем в военном деле // XXXVI Международная научно-практическая конференция «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, Российская Федерация, 25 апреля 2024). Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 49. EDN:TYHIZU
4. Кашеварова Н.А., Куликова М.Е. Интеграция блокчейна и искусственного интеллекта как механизма модернизации различных отраслей экономики // Вестник университета. 2024. № 5. С. 54–67. DOI:10.26425/1816-4277-2024-5-54-67. EDN:YMKWPE
5. Грепан В.Н. Анализ и эффективность применения кодов коррекции ошибок в блокчейне // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 7(76). С. 253–262. EDN:SMSYYR
6. Киямов Ж.У. О проблемах оптимизации и безопасности для многоуровневой виртуальной сети. Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. URL: https://disser.spbu.ru/files/2023/disser_kiyamov.pdf (дата обращения 15.10.2024)
7. Звозникова Г.О. Обзор алгоритмов технологий blockchain // Теория и практика современной науки. 2020. № 5(59). С. 187–190. EDN:LNYGCV
8. Канатъев К.Н., Большаков В.Н., Анисимов А.Р., Скоморохина Е.Р., Чикенев С.Д. Анализ возможностей технологии блокчейн в управлении данными // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 174–178. EDN:XVVEUW
9. Pomogalova A.V., Elagin V.S., Vladiko A.G., Donskov E.A. Methods for evaluating network characteristics on blockchain-v2x system nodes // Proceedings of the Conference on Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (SOSG, Moscow, Russian Federation, 15–17 March 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744263. EDN:JDDQVF
10. Гарипов Р.И., Максимова Н.Н. Анализ методических подходов к оценке эффективности блокчейна // Управление в современных системах. 2020. № 1(25). С. 13–17. EDN:URBTFO
11. Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladiko A.G. Aspects of Data Transfer and Synchronization for Vulnerable Road Users Emergency Scenarios Based on Blockchain Technology in ITS // Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Vyborg, Russian Federation, 1–3 July 2024). IEEE, 2024. DOI:10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617888
12. Андрианова Е.Г., Головин О.Л. Концептуальные аспекты построения доверенных неоднородных блокчейн-сред нового технологического уклада // ИТ-Стандарт. 2017. № 3(12). С. 1–6. EDN:ZTUOER
13. Елагин В.С., Спиркина А.В., Владыко А.Г., Иванов Е.И., Помогалова А.В., Аптриева Е.А. Основные сетевые характеристики blockchain трафика и подходы к моделированию // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 39–45. DOI:10.36724/2072-8735-2020-14-4-39-45. EDN:QWRTMK
14. Шалева А.С. Моделирование и оптимизация алгоритма распространения сообщений в одноранговой блокчейн-сети NEO. СПб.: СПбГУ, 2021. URL: <https://dSPACE.spbu.ru/bitstream/11701/32274/1/st050450.pdf> (дата обращения 15.10.2024)

References

1. Bakhvalova E.A., Sudakov V.A. Research of consensus algorithms for blockchain platforms. *Keldysh IPM preprints*. 2021;26:16. (in Russ.) DOI:10.20948/prepr-2021-26
2. Bagdasaryan K.M., Yeremin V.D. Theoretical Aspects of Cryptoeconomics Development and Prospects for the Use of Blockchain Technology In The Financial Sector. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021;13(1):21. (in Russ.) EDN:SLAEMB
3. Verbitskiy A.S., Barsukov N.M. Purpose and Approaches to Creating Intelligent Systems in Military Affairs. *Proceedings of the XXXVIth International Scientific and Practical Conference on Modern Science: Topical Issues, Achievements and Innovations, 25 April 2024, Penza, Russian Federation*. Penza: Nauka i Prosveshchenie Publ.; 2024. p.49. (in Russ.) EDN:TYHIZU
4. Kashevarova N.A., Kulikova M.E. Integration of Blockchain and Artificial Intelligence as a Mechanism for Modernisation of Various Economic Sectors. *Vestnik Universiteta* 2024;5:54–67. (in Russ.) DOI:10.26425/1816-4277-2024-5-54-67. EDN:YMKWPE
5. Grepan V.N. Analysis and Efficiency Applying Correction Codes Errors in Blockchain. *Vestnik nauki*. 2024;3(7):253–262. (in Russ.) EDN:SMSYYR

6. Kiyamov J.U. *About Problems of Optimisation and Safety for Multilevel Virtual Network*. Ph.D. Thesis. St. Petersburg, 2023. (in Russ.) URL: https://disser.spbu.ru/files/2023/disser_kiyamov.pdf [Accessed 15.10.2024]
7. Zvoznikova G.O. Overview of Blockchain Technology Algorithms. *Teoriia i praktika sovremennoi nauki*. 2020;5(59): 187–190. (in Russ.) EDN:LNYGCV
8. Timofeev G.A., Bolshakov V.N., Anisimov A.R., Skomorokhina E.R., Chikenev S.D. Analysis of Blockchain Technology Possibilities in Data Management. *Innovatsii i investitsii*. 2023;5:174–178. (in Russ.) EDN:XVVEUW
9. Pomogalova A.V., Elagin V.S., Vladyko A.G., Donskov E.A. Methods for evaluating network characteristics on blockchain-v2x system nodes. *Proceedings of the Conference on Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG, 15–17 March 2022, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744263. EDN:JDDQVF
10. Garipov R.I., Maximova N.N. Analysis of Methodical Approaches to Evaluating Blockchain Efficiency. *Upravlenie v sovremennykh sistemakh*. 2020;1(25):13–17. (in Russ.) EDN:URBTFO
11. Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G. Aspects of Data Transfer and Synchronization for Vulnerable Road Users Emergency Scenarios Based on Blockchain Technology in ITS. *Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO, 1–3 July 2024, Vyborg, Russian Federation*. IEEE; 2024. DOI:10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617888
12. Andrianova E.G., Golovin O.L. Conceptual Aspects of Building a Trusted Heterogeneous Blockchain-Environments of a New Technological Structure. *IT-Standard*. 2017;3:1–6. (in Russ.) EDN:ZTUOER
13. Elagin V.S., Spirikina A.V., Vladyko A.G., Ivanov E.I., Pomogalova A.V., Aptreva E.A. The Main Network Characteristics of Blockchain Traffic and Modeling Approaches. *T-Comm*. 2020;14(4):39–45. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2020-14-4-39-45. EDN:QWRTMK
14. Shaleva A.S. *Modelling and Optimisation of the Message Distribution Algorithm in Peer-to-Peer Blockchain NEO Network*. St. Petersburg: St Petersburg University Publ.; 2021. URL: <https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/32274/1/st050450.pdf> [Accessed 15.10.2024]

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; одобрена после рецензирования 22.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.

The article was submitted 16.09.2024; approved after reviewing 22.10.2024; accepted for publication 23.10.2024.

Информация об авторе:

ПОМОГАЛОВА
Альбина Владимировна

старший преподаватель кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-8129-989X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-43-49>

Методика измерения занятости радиочастотного спектра, изменяющейся в соответствии с суточным циклом

Антон Борисович Токарев, tokarevab@ircoc.vrn.ru
Александр Витальевич Останков, rt.kaf@cchgeu.ru
Виктор Юрьевич Полев ✉, victor.polev@mail.ru

Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394026, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Управление использованием радиочастотного спектра требует учета реальной занятости радиоканалов и полос частот. Однако модели изменения занятости, лежащие в основе документов Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R), не в полной мере соответствуют потребностям практики. Часть рекомендаций МСЭ-R ориентирована на оценивание локальной занятости для непродолжительных временных интервалов; другие рекомендации предполагают проведение измерений в стационарных радиоканалах, хотя далеко не для всех реальных радиоканалов можно рассчитывать на постоянство занятости на неограниченно протяженных участках оси времени. Вместе с тем, деятельность многих организаций, а значит и используемых ими ресурсов, подчиняется суточному циклу активности, что позволяет рекомендовать к рассмотрению модель изменения занятости в соответствии с суточным циклом.

Целью работы является разработка методики для осуществления сбора информации и формирования оценки суточного изменения занятости для анализируемых радиоканалов.

Используемые методы. Разработка рекомендаций по сбору данных для контроля занятости базируется на практических подходах служб радиоконтроля и классических методах статистического анализа.

Научная новизна. В настоящей работе предложена к использованию новая модель изменения занятости радиочастотных каналов в соответствии с суточным циклом, а также обоснованная со статистических позиций методика измерения занятости.

Результат. Предлагаемая методика позволяет получить практически ориентированную оценку изменения занятости, не требующую замены парка аппаратуры, традиционно используемой службами радиоконтроля; необходимые изменения могут быть реализованы относительно несложной доработкой программного обеспечения. В работе приведены предварительные рекомендации по обеспечению точности и надежности осуществляемых измерений. Вместе с тем, традиционно применяемый математический аппарат предполагает ограничение относительной погрешности измерений. Для наиболее важных с позиций практики радиоканалов с низкой занятостью такое ограничение осложняется необходимостью весьма протяженных измерений. Представляет интерес поиск альтернативных требований к точности измерений, соответствующих реальным потребностям служб радиоконтроля.

Практическая значимость: внедрение разработанной методики позволит устранить имеющееся на настоящий момент противоречие между теоретическими положениями, лежащими в основе рекомендаций МСЭ, и практикой проведения радиоконтрольных измерений.

Ключевые слова: радиоконтроль, занятость радиочастотного спектра, методика оценивания, ежесуточный цикл изменения занятости

Ссылка для цитирования: Токарев А.Б., Останков А.В., Полев В.Ю. Методика измерения занятости радиочастотного спектра, изменяющейся в соответствии с суточным циклом // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 43–49. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-55-61. EDN:QJAURR

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-43-49>

The Method of Measuring the Occupancy of the Radio Frequency Spectrum, Varying According to the Daily Cycle

Anton B. Tokarev, tokarevab@ircoc.vrn.ru

Alexander V. Ostankov, rt.kaf@cchgeu.ru

Victor Yu. Polev ✉, victor.polev@mail.ru

Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394026, Russian Federation

Annotation

Relevance. Management of the use of the radio frequency spectrum requires taking into account the actual occupancy of radio channels and frequency bands. However, the patterns of occupancy change underlying the International Telecommunication Union (ITU-R) Radiocommunication Sector documents do not fully meet the needs of practice. Some of the ITU-R recommendations are focused on estimating local occupancy for short time intervals; other recommendations involve measurements in stationary radio channels, although only a small part of real radio channels can be counted on to have the constant occupancy throughout the time axis. At the same time, the activities of many organizations, and therefore the resources they use, are subject to a daily cycle of activity, which allows us to recommend for consideration a model of occupancy change in accordance with the daily cycle.

The aim of the work is to develop a methodology for collecting information and forming an estimate of the daily occupancy change for the analyzed radio channels.

Methods used. The development of recommendations for the collection of data for occupancy monitoring is based on the practical approaches of radio monitoring services and classical methods of statistical analysis.

Novelty. In this paper, a new model for changing the occupancy of radio frequency channels in accordance with the daily cycle is proposed for use, as well as a statistically justified method for measuring occupancy.

Result. The proposed methodology allows us to obtain a practically oriented assessment of occupancy changes, which does not require replacing the fleet of equipment traditionally used by radio monitoring services; the necessary changes can be implemented with relatively simple software modification. The paper provides preliminary recommendations for ensuring the accuracy and reliability of measurements, based on a traditionally used mathematical apparatus, which involves limiting the relative measurement error. This entails the need for very long measurements for the most important low-occupied radio channels. So, it is necessary to look for alternative measurement accuracy requirements that would meet the real needs of radio monitoring services.

Practical significance. The acceptance of the developed methodology will eliminate the currently existing contradiction between the theoretical provisions underlying the ITU recommendations and the practice of conducting radiocontrolled measurements.

Keywords: radio monitoring, radio frequency spectrum occupancy, assessment methodology, daily cycle of occupancy change

For citation: Tokarev A.B., Ostankov A.V., Polev V.Yu. The Method of Measuring the Occupancy of the Radio Frequency Spectrum, Varying According to the Daily Cycle. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):43–49. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-55-61. EDN:QJAURR

Введение

Ежегодный рост объема информации, передаваемой разнообразными радиотехническими системами, указывает на возрастание потребности в радиочастотном ресурсе, однако на практике наблюдается заметный разброс степени реального

использования различных каналов и полос частот потребителями. Одним из важнейших показателей, отражающих их реальную степень использования, является занятость радиочастотного спектра, которая определяет вероятность того, что в случайно выбранный момент времени радиоча-

стотный канал (полоса частот) будет использоваться для передачи информации [1]. И хотя уже несколько десятков лет вопросы измерения занятости находятся в сфере внимания Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R), в текущих версиях рекомендаций МСЭ сохраняется ряд неясностей. Во многих документах рекомендуется разбивать ось времени на отдельные интервалы, называемые интервалами интегрирования T_i , и использовать эти интервалы для сбора данных и формирования локальных измерений занятости. В то же время отмечается, что отдельные локальные оценки, как правило, характеризуются низкой достоверностью, однако конкретную рекомендацию, как следует накапливать (комбинировать) локальные оценки для получения устойчивых результатов, найти в документах МСЭ проблематично.

Например, во многих документах МСЭ рекомендуется выбирать интервал интегрирования T_i равным 15 минут, а рисунок 15 Отчета МСЭ-R SM.2256-1 «Измерения и оценка занятости спектра» [2] отображает результаты измерения занятости с разрешением по времени, составляющем те же 15 минут. И такой вариант контроля за изменениями занятости мог бы считаться логичным, если бы таблица 4.10-1 из справочника «Контроль за использованием спектра» [3] или таблица 1 из Рекомендации ITU-R SM.1880-2 [4] не указывали, что время, необходимое для получения обоснованной уверенности в результатах оценивания занятости, может заметно превышать 1 час. Разъяснений о том, как можно согласовать измерение занятости за 15 минут или, скажем, за последний час с необходимостью многочасового сбора данных для обеспечения достоверности получаемых результатов, разыскать в документах МСЭ не удается. Таким образом, имеется актуальная задача конкретизировать методику измерения занятости так, чтобы снять возникающие противоречия.

Циклостационарная модель изменения занятости

Причиной возникновения противоречий является, по-видимому, тот факт, что с позиции основополагающей статьи [1] анализируемые радиоканалы предполагаются стационарными, а Рекомендации МСЭ направлены на отслеживание изменений занятости вдоль оси времени. Для того, чтобы устранить выявленную разницу в базовых моделях, отметим, что с практических позиций вполне естественным является предположение о периодическом (скажем, привязанном к суточному либо недельному циклу) изменении занятости радиоканала. Т. е. один радиоканал может демонстрировать большую занятость в рабочие дни, а другой – в выходные; какие-то радиоканалы будут

интенсивнее использоваться в дневные часы, а иные каналы – в ночное время.

Предположение о зависимости занятости каналов передачи информации систем и сетей связи от времени суток не является новым. К примеру, в Отчете по научно-исследовательской работе Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-T)¹ изучался вопрос о росте трафика видеоконференцсвязи под влиянием мер противодействия распространению коронавирусной инфекции. И хотя задачей Отчета была демонстрация роста трафика из-за перехода к преимущественно дистанционному режиму общения, содержащиеся в нем сведения (рисунок 1) убедительно отражают циклостационарный характер изменения объема передаваемых данных (с уменьшением объема в выходные дни, что свидетельствует в пользу недельного цикла изменения занятости).

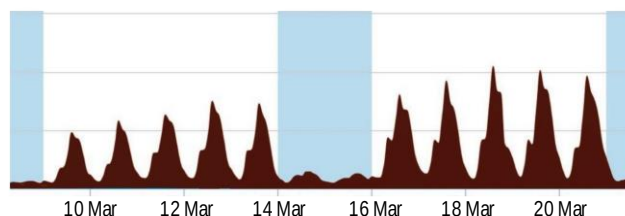


Рис. 1. Характер двухнедельного изменения трафика видеоконференцсвязи (фрагмент рисунка 2.3 из Отчета МСЭ-T)

Fig. 1. Typical Example of the Two-Week Change in Video Conferencing Traffic (Fragment of Figure 2.3 from the ITU-T Report)

Аналогичные статистические свойства трафика обсуждаются, к примеру, в статье [5]; график изменения занятости сети (рисунок 2) убедительно показывает возможность значительных колебаний объема передаваемых данных в пределах суток.

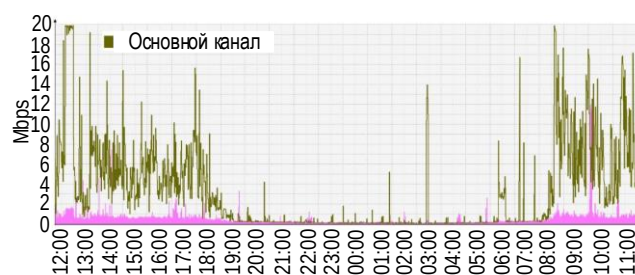


Рис. 2. Суточный характер изменения трафика [5]

Fig. 2. An Example of Daily Traffic Changes [5]

Статистическое усреднение сведений о занятости, выполненное в работе [5], позволило ее авто-

¹ Отчет по научно-исследовательской работе «Разработка рекомендаций по требованиям к качеству обслуживания в условиях его деградации при перегрузках, вызываемых пандемией, с целью обеспечения устойчивого функционирования сетей связи». URL: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Publications/TR%20Development%20of%20recommendations%20for%20service%20quality%20requirements%20under%20downgrading%20in%20pandemic%20congestion%20to%20ensure%20sustainable%20operation%20of%20communication%20networks.pdf>

рам разработать алгоритм прогнозирования динамики изменения трафика отдельного фрагмента сети (рабочего места), показанный на рисунке 3 и также имеющий циклостационарный характер.



Рис. 3. Среднесуточное изменение загрузки сети (на основе данных из [5])

Fig. 3. Average Daily Change in Network Occupancy (Based on Data From [5])

Сведения, приводимые в учебных пособиях, например [6], также убедительно свидетельствуют о суточной цикличности изменения объема передаваемых данных. На рисунке 4 представлены сформированные на основе [6] графики изменения трафика мультимедийных сообщений и трафика мобильного доступа к Intranet / Extranet. Оба графика подтверждают существенную зависимость объема трафика от времени суток.

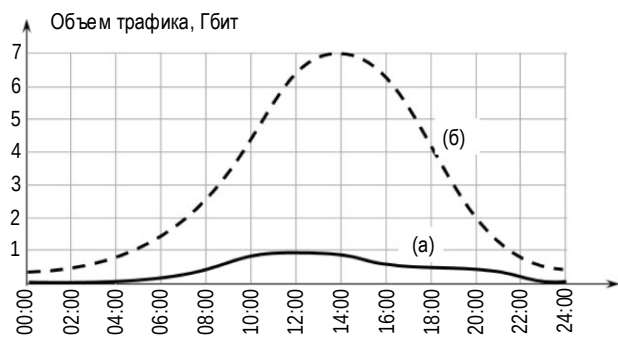


Рис. 4. Изменение трафика мультимедийных сообщений (а) мобильного доступа к Intranet / Extranet (б) [6]

Fig. 4. Changing the Traffic of Multimedia Messages (a); of Mobile Access to Intranet / Extranet (b) [6]

Возвращаясь к уже упоминавшемуся ранее рисунку 15 Отчета МСЭ-R SM.2256-1 [2], копия которого показана на рисунке 5, отметим, что и взятый из документации МСЭ-R график однозначно предполагает зависимость занятости от времени суток. Однако при обсуждении вопросов об обеспечении достоверности измерений занятости, ни в основополагающей статье [1], ни в Отчете МСЭ-R SM.2256-1, ни в справочнике [3], ни в Рекомендации ITU-R SM.1880-2 [4] циклостационарный характер изменения занятости во времени не упоминается. Вместе с тем, согласно представленным

выше сведениям, именно циклостационарная модель соответствует потребностям практики в наибольшей степени. В соответствии с этой моделью на протяжении суток занятость может существенно изменяться, но значения занятости, «привязанные» ко времени суток или к дням недели, обладают стабильностью (постоянством на продолжительных временных интервалах). Т. е. предполагается, что, если, к примеру, ежедневно замерять занятость какого-то канала в ночное время с 1 часа до 2 часов ночи, то получаемые значения будут сравнительно стабильными. Аналогичные замеры, сделанные между 13 и 14 часами, также будут давать стабильные значения, но отличающиеся от результатов ночных замеров. И именно оценка суточного (либо недельного) цикла изменения занятости представляет интерес для служб радиоконтроля.



Рис. 5. Типовая структура трафика в одном частотном канале (копия рисунка 15 из [2])

Fig. 5. Typical Traffic Structure in One Frequency Channel (Copy of Figure 15 from [2])

С позиций повышения эффективности использования радиочастотного спектра важным оказывается обнаружение радиочастотных ресурсов, которые явно недоиспользуются. К примеру, если для анализируемого канала характерна занятость, превышающая 50 % в дневные часы и близкая к нулю в ночное время, то в ночное время такой ресурс вполне можно предоставить иной радиосистеме с запретом на использование ею радиоканала в дневные часы.

Разработка методики оценивания изменений занятости во времени

Итак, циклостационарная модель изменения занятости является практически ориентированной и открывает путь для разработки методики измерений занятости, целью которой является формирование достоверной зависимости занятости радиоканалов (либо иных частотных ресурсов) от времени суток (и / или дня недели). Предложенная модель циклично изменяющейся занятости позволяет устранить противоречия между «глобальным» оцениванием занятости, характер-

ным для статьи [1], и набором не обладающих статистической устойчивостью локальных оценок занятости на отдельных 15-минутных интервалах. Действительно, если параметры аппаратуры радиоконтроля и характер радиоизлучений, наблюдаемых в канале, не позволяют сформировать достоверную оценку занятости на отдельном интервале интегрирования T_i , то следует просто продолжить аналогичные измерения на следующие сутки или еще несколько дней, и в итоге усреднить накопленные за несколько суток сведения, сформировав стабильную оценку суточного цикла изменений занятости с любой необходимой статистической устойчивостью.

Говоря о методике измерения занятости с повышенной цикличностью для стороннего пользователя, представляется желательным иметь равномерное разрешение по времени. Т.е. «хорошим конечным продуктом измерений» является, например, график изменения занятости канала в течение суток с 15-минутным разрешением по времени. Однако, если занятость канала в течение суток испытывает заметные вариации, то и требуемая продолжительность сбора данных для разных 15-минутных интервалов может существенно различаться. Это означает возможность того, что через, к примеру, 2-3 дня после начала сбора данных для некоторых радиоканалов уже окажется сформированной достоверная оценка занятости, а для иных каналов будет необходимо продолжать сбор данных еще много суток. Вместе с тем, если делить ось времени не на 15-минутные, а на часовые интервалы, то каждый часовой интервал будет характеризоваться в 4 раза большим объемом данных, который может оказаться достаточным для получения «хорошей» оценки занятости.

Отметим, что предлагаемое расширение интервала контроля до часового интервала уже используется в документах МСЭ; в частности, на уже упоминавшемся рисунке 15 Отчета МСЭ-R SM.2256-1 [2] наряду с текущими значениями занятости отображается линия, отражающая скользящее среднее значений занятости в течение последнего часа (но при этом информация о способах обеспечения и степени точности и статистической надежности этих измерений отсутствует).

Сведения из рекомендаций МСЭ-R и изложенные выше соображения обосновывают целесообразность следующей методики оценивания суточного цикла изменения занятости:

1) на протяжении нескольких суток производится накопление локальных оценок занятости для $T_i = 15$ минут:

$$SOCR_{i,j} = \frac{N_{oi}}{N_{i,j}}, \quad (1)$$

где индекс i определяет порядковый номер текущего 15-минутного интервала внутри суток; j – порядковый номер текущих суток сбора данных; $N_{i,j}$ – общее количество выборок (моментов контроля состояния радиоканала) на интервале интегрирования; N_{oi} – количество случаев регистрации занятого состояния канала;

2) для каждой из 92 контрольных точек, на которые разбивается суточный интервал при 15-минутном разрешении, рассчитывается оценка математического ожидания занятости, где в усреднении участвуют локальные оценки на двух предшествующих контрольной точке времени интервалах T_i и на двух смежных интервалах, стартом которых служит i -й момент времени (2);

3) для каждой из оценок (2) определяется количество выборок, по которым сформирована эта оценка (3).

$$SOCR(i) = \frac{1}{4J} \cdot \sum_{j=1}^J (SOCR_{i-2,j} + SOCR_{i-1,j} + SOCR_{i,j} + SOCR_{i+1,j}), \quad (2)$$

$$N(i) = \sum_{j=1}^J (N_{i-2,j} + N_{i-1,j} + N_{i,j} + N_{i+1,j}). \quad (3)$$

Если количество выборок $N(i)$ при занятости канала $SOCR(i)$ является достаточным для каждого i для обеспечения требований к точности и надежности занятости, то процедура сбора и обработки считается завершенной. Если же сведений пока недостаточно, то следует продолжать накопление данных как минимум еще на протяжении суток (рисунок 6).

Отметим, что, хотя при выборе критерия достаточности проведенных измерений для обеспечения точности и надежности оценивания занятости

следует опираться на сведения, имеющиеся в документации МСЭ-R; непосредственных рекомендаций, ориентированных на циклостационарную модель изменения занятости, в документах МСЭ не имеется. Если полагать, что в отношении статистических характеристик продолжительности сигналов и пауз между выходами в эфир сигналов в анализируемых радиоканалах имеется достоверная априорная информация, то в качестве «инструмента» обеспечения достоверности измерений можно рекомендовать подход, изложенный,

например, в [7]. Из сопоставления темпа контроля состояния радиоканала с типовой протяженностью радиопередач выносится заключение о степени взаимной зависимости смежных по времени выборок (случаев контроля состояния радиоканала) и в соответствии с таблицей 1 определяется минимально необходимое количество накапливаемых выборок данных и продолжительности сбора информации. Предполагается, что период выборки составляет 1 с; N_{ind} – число требуемых независимых выборок; N_{dep} – число требуемых зависимых выборок; H_{dep} – число часов при зависимых выборках.



Рис. 6. Схема объединения локальных оценок, полученных на отдельных интервалах интегрирования T_i , в соответствии с предлагаемой методикой

Fig. 6. Scheme for Combining Local Estimates Obtained at Separate Integration Intervals T_i in Accordance with the Proposed Methodology

ТАБЛИЦА 1. Продолжительность сбора данных при зависимых и независимых выборках, необходимая для достижения относительной точности 10 % и уровня достоверности 95 % при различном проценте занятости

TABLE 1. Duration of Data Collection When Using Dependent and Independent Samples Required to Achieve a Relative Accuracy of 10 % and a Confidence Level of 95 % with Varying Percentages of Occupancy

Занятость (%)	N_{ind}	При средней продолжительности передач			
		порядка 1,5 сек		порядка 12 сек	
		N_{dep}	H_{dep}	N_{dep}	H_{dep}
6,67	5368	16641	4,6	128910	35,8
10	3461	10730	3,0	83112	23,1
15	2117	6563	1,8	50837	14,1
20	1535	4759	1,3	36861	10,2
30	849	2632	0,72	20388	5,7
40	573	1777	0,5	13760	3,8
50	381	1182	0,32	9149	2,5
60	253	785	0,22	6076	1,7
70	162	502	0,15	3890	1,1

Вместе с тем, считать именно такой вариант обеспечения достоверности измерений наиболее подходящим для практики сложно по многим причинам. Во-первых, априорные сведения о продолжительности сигналов и пауз в контролируемых каналах доступны не всегда. Во-вторых, требова-

ния к качеству измерений в работах [1 и 7] базируются на ограничении предельно допустимой погрешности измерений занятости, а потому при типовом пороге допустимости отклонений в 10 % при истинном уровне занятости $SO = 50$ % считается допустимыми отклонения в ± 5 %, а для $SO = 1$ % предполагается, что оценка занятости должна отличаться от SO не более чем на 0,1 %. Такого рода ограничения вполне естественны с позиции математики, но с позиции практики радиоконтроля столь жесткие требования являются избыточными, а потому вопрос управления точностью и достоверностью измерений следует считать все еще актуальным, требующим более глубокой проработки.

Заключение

Рекомендации МСЭ-R в отношении вопроса измерения занятости радиоканалов и иных частотных ресурсов предполагают контроль за изменением занятости с типовым 15-минутным разрешением по времени, однако не содержат конкретной методики обеспечения статистической достоверности подобных измерений.

В основу разработки методики измерений целесообразно положить циклостационарную модель изменений занятости с суточной, либо недельной периодичностью. Предположение о том, что занятость анализируемого канала для конкретного временного интервала в рамках суточного цикла может демонстрировать стабильные значения, вполне соответствует практике радиоконтроля и, одновременно, порождает возможность сформировать простую, понятную и надежную методику оценивания занятости.

Предложенная в настоящей работе методика не противоречит сложившейся к настоящему времени практике измерения занятости радиочастотных ресурсов, но лишь дополняет и конкретизирует ее, открывая возможность снять противоречия в вопросе обеспечения статистической достоверности измерений. Для внедрения методики в практику не требуется изменения парка аппаратуры средств радиоконтроля; достаточно простой коррекции процедуры управления сбором данных и незначительной доработки программного обеспечения. Более того, допустимым, хотя и вряд ли желательным, оказывается применение низкопроизводительных средств радиоконтроля. При их использовании накопление необходимого количества выборок будет происходить медленнее, но предлагаемая методика не накладывает существенных ограничений на темп сбора данных, а потому низкий темп сбора данных повлечет лишь необходимость затрачивать дополнительно несколько суток на процедуру сбора данных без какого-либо ущерба в качестве конечных результатов.

Предложенная методика оказывается практичной и с позиции возможности досрочного прерывания сбора данных при оценивании занятости. Представим, что за несколько суток наблюдения для каких-то 15-минутных интервалов уже собран достаточный объем данных, а достоверность измерений на иных временных интервалах еще недостаточна. Это не означает, что в отношении «проблемных» интервалов пользователь не может получить никаких полезных сведений, так как оценка занятости (2) является несмещенной, а значит в среднем результат измерений занятости

является корректным даже при краткосрочных наблюдениях; просто каждая из оценок суточного цикла должна сопровождаться сопутствующим уровнем достоверности: высоким для «хороших» временных интервалов и недостаточным для «проблемных» временных интервалов. По мере сбора данных достоверность оценивания занятости для каждого из интервалов будет в среднем возрастать. Сбор сведений прекращается, как только с необходимым уровнем достоверности будет представлен каждый из 15-минутных интервалов оценивания за сутки.

Список источников

1. Spaulding A.D., Hagn G.H. On the Definition and Estimation of Spectrum Occupancy // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1977. Vol. EMC-19. Iss. 3. PP. 269–280. DOI:10.1109/TEMC.1977.303595
2. Отчет МСЭ-R SM.2256-1 (08/2016) Измерения и оценка занятости спектра.
3. Handbook. Spectrum monitoring. Switzerland, Geneva, 2011.
4. Rec. ITU-R SM.1880-2 (09/2017) Spectrum occupancy measurements and evaluation. Geneva.
5. Игумнов А.О. Алгоритм прогнозирования динамики изменения трафика с использованием статистических данных // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1(44). С. 53. EDN:ZBBNFJ
6. Голиков А.М. Транспортные и мультисервисные системы и сети связи: учебное пособие. Часть 1. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2015. 83 с.
7. Токарев А.Б., Козьмин В.А., Павлюк А.П., Полев В.Ю. Продолжительность сбора данных при измерениях занятости стационарных радиоканалов // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 43–58. DOI:10.24412/2410-9916-2024-1-043-058. EDN:AYBQFD

References

1. Spaulding A.D., Hagn G.H. On the Definition and Estimation of Spectrum Occupancy. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1977; EMC-19(3):269–280. DOI:10.1109/TEMC.1977.303595
2. Report ITU-R SM.2256-1 (08/2016) *Measurements and assessment of spectrum occupancy*.
3. *Handbook. Spectrum monitoring*. Geneva; 2011.
4. Rec. ITU-R SM.1880-2 (09/2017) *Spectrum occupancy measurements and evaluation*.
5. Igumnov A.O., Sonkin M.A. Traffic dynamic prediction algorithm using statistical data. *Engineering Journal of Don*. 2017; 1(44):53. EDN:ZBBNFJ
6. Golikov A.M. *Transport and multiservice systems and communication networks. Part 1*. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ.; 2015. 83 p.
7. Tokarev A.B., Kozmin V.A., Pavlyuk A.P., Polev V.Yu. Duration of data collection when measuring occupancy of stationary radio channels. *Control Systems, Communications and Security*. 2024;1:43–58. DOI:10.24412/2410-9916-2024-1-043-058. EDN:AYBQFD

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 03.10.2024.

The article was submitted 30.07.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 03.10.2024.

Информация об авторах:

ТОКАРЕВ
Антон Борисович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Воронежского государственного технического университета
 <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

ОСТАНКОВ
Александр Витальевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники Воронежского государственного технического университета
 <https://orcid.org/0000-0002-2039-4081>

ПОЛЕВ
Виктор Юрьевич

аспирант кафедры радиотехники Воронежского государственного технического университета
 <https://orcid.org/0009-0009-1902-7207>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Обзорная статья

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-50-78>

Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности

 Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность. Настоящая работа является второй частью цикла, посвященного исследованию комплекса моделей позиционирования в сетях шестого поколения терагерцового диапазона, и решает задачи систематизации алгоритмов и оценки точности определения местоположения пользовательского устройства в зависимости от конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Цель. В рамках обозначенной в первой части цикла научной проблемы поиска средств достижения дециметровой точности оценок координат, выполненный в настоящем исследовании анализ моделей оценки точности, обзор алгоритмов и путей их оптимизации, а также численный эксперимент служит цели обоснования используемой конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Методом исследования является аналитический обзор состояния проблемы по актуальным научным публикациям, концептуальное моделирование, категориальный подход, экспертное комбинирование, сопоставительный анализ, формализация, математическое и имитационное моделирование.

Решение / результаты. Приводятся модели оценки точности позиционирования в сетях 6G терагерцового диапазона, формализуется взаимосвязь первичных измерений и оценок координат для многопозиционного и однопозиционного определения местоположения в ближней и дальней зоне. Выполняется обзор алгоритмов геометрического определения местоположения и позиционирования с обучением для случаев одноэтапной и двухэтапной обработки; анализируется специфика реализации алгоритмов одновременного отслеживания и построения карты. Приводится анализ особенностей оптимизации алгоритмов в режимах оффлайн и онлайн. Средствами имитационного моделирования выполняется оценка точности для сценария территориального распределения с прямой видимостью с идеальной синхронизацией.

Новизна. Средствами имитационного моделирования научно обосновано достижение дециметровой точности оценок координат и ориентации в 1° в терагерцовом диапазоне для модели дальней зоны при использовании полосы 1 ГГц и составного массива антенной решетки из более чем полутысячи элементов.

Теоретическая значимость заключается в установлении зависимости точности оценок координат и ориентации устройства от конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Практическая значимость разработанной имитационной модели заключается в численном обосновании пределов точности позиционирования устройства в сетях шестого поколения в зависимости от используемой на базовой станции антенной решетки для заданного сценария.

Ключевые слова: позиционирование, ориентация, терагерцовый диапазон, сети 6G, составной массив антенной решетки, точность оценки координат и ориентации, нижняя граница Крамера – Рао, информационная матрица Фишера

Источник финансирования: научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 50–78. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90. EDN:DUMKWF

Review research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-50-78>

A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 2. Review of Algorithms and Accuracy Assessment

 Grigoriy A. Fokin, fokin.ga@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. This work is the second part of a series devoted to the study of a set of positioning models in sixth-generation terahertz networks and solves the problems of systematizing algorithms and assessing the accuracy of determining the location of a user device depending on the configuration and size of the antenna array at the base station.

Purpose. Within the framework of the scientific problem of searching for means of achieving decimeter accuracy of coordinate estimates, outlined in the first part of the cycle, the analysis of accuracy assessment models, a review of algorithms and ways of their optimization, as well as a numerical experiment, performed in this study serve the purpose of justifying the configuration and dimensions of the antenna array used at the base station.

The research method is an analytical review of the state of the problem based on current scientific publications, conceptual modeling, categorical approach, expert combination, comparative analysis, formalization, mathematical and simulation modeling.

Solution / results. The paper presents models for assessing the accuracy of positioning in 6G terahertz networks, formalizes the relationship between primary measurements and coordinate estimates for multi-position and single-position positioning in the near and far zones. It provides an overview of algorithms for geometric positioning and positioning with training for cases of one-stage and two-stage processing; analyzes the specifics of implementing algorithms for simultaneous tracking and map construction. It provides an analysis of the features of optimizing algorithms in offline and online modes. Simulation modeling is used to assess the accuracy for a scenario of territorial distribution with direct visibility and ideal synchronization.

Novelty. Using simulation modeling tools, the achievement of decimeter accuracy of coordinate and orientation estimates of 1° in the terahertz range for a far-field model using a 1 GHz band and a composite antenna array of more than half a thousand elements has been scientifically substantiated.

The theoretical significance lies in establishing the dependence of the accuracy of coordinate and orientation estimates of the device on the configuration and dimensions of the antenna array at the base station.

The practical significance of the developed simulation model lies in the numerical justification of the limits of device positioning accuracy in sixth-generation networks depending on the antenna array used at the base station for a given scenario.

Keywords: positioning, orientation, terahertz range, 6G networks, composite antenna array, coordinate and orientation estimation accuracy, Cramer – Rao lower bound, Fisher information matrix

For citation: Fokin G.A. A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 2. Review of Algorithms and Accuracy Assessment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):50–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90. EDN:DUMKWF

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает цикл [1], посвященный исследованию комплекса моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения терагерцового диапазона. Условия работы

технологий позиционирования устройств в сетях шестого поколения имеют географическую протяженность в единицы-десятки метров и ограничены, преимущественно, сценариями внутри помещений. Материал исследования организован

далее следующим образом. В разделе 2 приводятся модели оценки точности позиционирования в сетях 6G. В разделе 3 выполняется обзор известных алгоритмов позиционирования применительно к сетям терагерцового диапазона, включая алгоритмы геометрического определения местоположения и алгоритмы позиционирования с обучением. В разделе 4 приводится анализ особенностей оптимизации алгоритмов и систем сетевого позиционирования в режимах оффлайн и онлайн. Материал разделов 2–4 основан на научно-методическом обзоре [2] и многолетнем авторском заделе в области сетевого позиционирования. В разделе 5 средствами имитационного моделирования выполняется оценка точности позиционирования для заданного сценария территориального распределения. Выводы и направления дальнейших исследований сформулированы в заключении.

2. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе выполняется формализация взаимосвязи первичных дальномерных (ДМ) и угломерных (УМ) измерений с точностью оценок координат и ориентации; приводится порядок вычисления нижней границы Крамера – Рао (НГКР) погрешности оценки координат и ориентации пользовательского устройства (UE, *аббр. от англ. User Equipment*).

2.1. Взаимосвязь первичных измерений и оценок координат

Формализуем взаимосвязь первичных измерений с искомой оценкой координат и ориентации UE. Для сбора первичных измерений могут использоваться различные опорные или пилотные сигналы. Порядок их сбора в текущий момент времени, помимо прочих факторов, определяется также информацией о предыдущем состоянии UE; например, для сбора первичных УМ измерений передавать или принимать опорные сигналы базовой станции gNB целесообразно в том диапазоне азимутов и углов места, в котором ранее уже было установлено направленное соединение с UE. При отсутствии информации о предыдущем состоянии UE, например, при начальном установлении направленного соединения, происходит выравнивание лучей, и обычно используется передача / прием случайных опорных сигналов или опорных сигналов из кодовой книги предварительно заданных направлений в достаточно широком диапазоне азимутов и углов места. При наличии информации о предыдущем состоянии UE, например, при продолжении ведения радиосвязи в уже установленном направленном соединении, выравнивание лучей может уточняться вместе с передачей / приемом опорных сигналов в

гораздо более узком диапазоне пространства азимутов и углов места [1].

Допустим, при g -й передаче передается вектор символов $\mathbf{x}^{(g)}$, а измерение выполняется по наблюдаемому принятому вектору символов $\mathbf{y}^{(g)}$. Для антенной решетки (АР) из составных массивов (AOSA, *аббр. от англ. Array of Sub Array*) матрицы углов диаграммообразования (ДО) $\Phi_B^{(g)}$, $\Phi_U^{(g)}$ выбираются для каждой g -й передачи / приема; для базовой станции матрица Φ_B' образуется из N_B векторов: $\Phi_B' = [\Phi_B'; \dots; \Phi_B']$, где N_B – число аналоговых радиочастотных модулей (RFC, *аббр. от англ. Radio Frequency Chain*) в АР базовой станции; а для UE матрица Φ_U' образуется из N_U векторов: $\Phi_U' = [\Phi_U'; \dots; \Phi_U']$, где N_U – число аналоговых RFC в АР устройства UE [2].

Матрицы Φ_B' и Φ_U' определяют эквивалентный коэффициент АР составного подмассива (SA, *аббр. от англ. Sub Array*), сформированного из N'_Q антенных элементов, $Q \in \{B, U\}$, который характеризует усиление $\mathcal{A}_Q(\Phi, \Phi')$ в направлении прихода / ухода Φ в локальной системе координат (СК) при ДО в SA для луча, ориентированного в направлении максимального излучения Φ' [1].

Из совокупности $g = 1, \dots, G$ передач по $k = 1, \dots, K$ поднесущим сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM, *аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) в результате объединения символов по $\mathbf{y}^{(g)}$ принятым векторам получим комплексный вектор наблюдения $\hat{\mathbf{Y}}$ размерности $\hat{\mathbf{Y}} \in \mathbb{C}^{GKN_B \times 1}$. Этот вектор образует набор исходных данных для сбора и обработки первичных ДМ и УМ измерений.

Введем вектор параметров состояний $\mathbf{s}$ и вектор параметров измерений $\mathbf{y}$. Первый содержит результаты оценки координат и ориентации UE, а также информацию о канале, например, коэффициенты передачи многолучевых компонент (МЛК), местоположение рассеивателей SP (*аббр. от англ. Specular Points*) и т. д. Параметры вектора состояний $\mathbf{s}$ можно разделить на параметры UE, и остальные параметры.

Параметры UE представляют интерес для решения задач позиционирования и образуют составной вектор $\mathbf{s}_U$, а остальные параметры состояния образуют составной вектор $\mathbf{s}_N$, так, что справедливо выражение [2]:

$$\mathbf{s}_U \cup \mathbf{s}_N = \mathbf{s}. \quad (1)$$

Вектор измерений $\mathbf{y}$ содержит параметры первичных измерений времени TOA (*аббр. от англ. Time of Arrival*) и угла прихода / ухода AOA / AOD (*аббр. от англ. Angle of Arrival / Departure*) сигнала, которые можно извлечь из комплексного вектора наблюдения $\hat{\mathbf{Y}}$.

Формализованные определения векторов состояний $\mathbf{s}$ и измерений $\mathbf{y}$ зависят от моделей и методов позиционирования и будут детализированы далее для трех различных сценариев определения местоположения (ОМП) в сетях 6G.

Сценарий 1. Многопозиционная оценка координат с участием нескольких базовых станций в традиционном для подвижной связи (CRF, *аббр. от англ. Conventional Radio Frequency*) диапазоне ультракоротких волн (УКВ) до 30 ГГц, включающем дециметровые (ДМВ) и сантиметровые (СМВ) волны. В первой части исследования [1] на рисунке 1 приведены 8 сценариев многопозиционной оценки координат.

Сценарий 2. Однопозиционная оценка координат и ориентации в дальней зоне с участием одной базовой станции в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) от 30 до 300 ГГц (10–1 мм) по прямому и отраженным лучам в условиях наличия (LOS, *аббр. от англ. Line of Sight*) и отсутствия (NLOS, *аббр. от англ. Non LOS*) прямой видимости в радиолинии «Базовая станция – Пользовательское устройство» (BS $\leftrightarrow$ UE); в первой части исследования [1] на рисунке 2 показан сценарий однопозиционной оценки координат.

Сценарий 3. Однопозиционная оценка координат и ориентации в ближней зоне (NF, *аббр. от англ. Near Field*) с участием одной базовой станции и одной реконфигурируемой интеллектуальной поверхности (RIS, *аббр. от англ. Reconfigurable Intelligent Surface*) в диапазоне дециметровых (ДММВ) или терагерцовых волн (ТГц) 0,3–3 ТГц (1–0,1 мм) по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолиниях BS $\leftrightarrow$ UE, BS $\leftrightarrow$ RIS, RIS $\leftrightarrow$ UE.

Для сценария 2 в диапазоне ММВ будем полагать использование полностью цифрового ДО, когда каждый элемент AP непосредственно связан с RFC, т. е. оборудован своим аналоговым трактом: при приеме сигнал поступает с RFC на аналого-цифровой преобразователь, а при передаче сигнал поступает с цифроаналогового преобразователя на RFC. Для сценария 3 в терагерцовом диапазоне будем полагать использование гибридного аналого-цифрового ДО, когда символы данных в информационной полосе частот (baseband) сначала прекодируются цифровым прекодером, а затем поступают на аналоговую диаграммообразующую схему, реализованную на фазовращателях. AP при этом образована набором из AOSA, когда каждый аналоговый тракт RFC связан только с частью элементов всей AP, образующих SA [1].

2.1.1. Многопозиционная оценка координат

Позиционирование в традиционном для подвижной радиосвязи диапазоне УКВ до 30 ГГц, объединяющем метровые, дециметровые и санти-

метровые волны, осуществляется посредством нескольких стационарных базовых станций в радиолиниях UE $\rightarrow$ BS обычно при LOS ДМ, разностно-дальномерным (РДМ) или УМ методом; также возможна комбинация перечисленных методов. На UE обычно отсутствует AP, поэтому позиционирование включает только оценку координат без оценки ориентации UE.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U], \quad (2)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{p}; \boldsymbol{\xi}; B], \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \boldsymbol{\xi}; \boldsymbol{\tau}; \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU}; B], \quad (4)$$

где вектора $\mathbf{p}$, $\boldsymbol{\xi}$ и $\boldsymbol{\tau}$ содержат, соответственно, амплитуды, фазы и задержки прихода сигнала в прямом и / или отраженных МЛК; например, вектор задержек прихода сигнала можно представить выражением $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1; \tau_2; \dots]$. При анализе канала «вверх» UE $\rightarrow$ BS вектор измеренных в локальной СК углов прихода AOA сигналов от UE на базовых станциях можно представить выражением $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU} = [\tilde{\varphi}_1; \tilde{\varphi}_2; \dots]$.

Зная матрицу поворота $\mathbf{R}_B$ AP базовой станции [1], можно вычислить вектор измеренных углов прихода AOA в глобальной СК $\boldsymbol{\varphi}_{BU}$. В случае отсутствия каких-либо первичных измерений в заданный момент времени, например, вектора углов прихода AOA $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU}$, вектор $\mathbf{y}$ компонуется теми измерениями, которые удалось собрать, например, вектором задержек прихода TOA $\boldsymbol{\tau}$.

1.1.2. Однопозиционная оценка координат и ориентации в дальней зоне

В диапазоне ММВ однопозиционная оценка координат и ориентации рассматривается для модели дальней зоны с участием одной базовой станции по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолинии BS $\leftrightarrow$ UE. Оценка ориентации UE становится возможной за счет его оборудования AP. Разрешение МЛК в условиях NLOS обусловлено свойством разряженности канала диапазона ММВ, когда вследствие высоких потерь при распространении радиоволн (РРВ) различимыми на приеме оказываются обычно единичные однократно отраженные лучи, которые можно использовать для позиционирования. Данное обстоятельство позволяет реализовывать на практике одновременную локализацию и построение карты SLAM (*аббр. от англ. Simultaneous Localization and Mapping*) за счет прогнозирования расположения отражателей. Остальные параметры канала, включая комплексные коэффициенты (вектор амплитуд $\mathbf{p}$ и фаз $\boldsymbol{\xi}$) и сдвиг синхронизации B , также могут быть установлены в ходе первичной обработки.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U], \quad (5)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U; \mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B], \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{t}; \tilde{\Phi}_{BU}; \tilde{\Phi}_{UB}; \tilde{\Phi}_{BN}; \tilde{\Phi}_{UN}], \quad (7)$$

где координаты $l = 1, \dots, L_N$ отражателей обозначаются $\mathbf{p}_N = [\mathbf{p}_1; \mathbf{p}_2; \dots; \mathbf{p}_{L_N}]$.

Вектор измеренного в локальной СК угла ухода AOD (азимут и угол места) сигнала от UE на базовую станцию в условиях LOS радиолоний $UE \rightarrow BS$ можно представить как $\tilde{\Phi}_{UB} = \tilde{\Phi}_{UB}^{(0)}$.

Вектор измеренных в локальной СК углов прихода AOA сигналов от $l = 1, \dots, L_N$ отражателей N на базовую станцию в условиях NLOS радиолоний $N \rightarrow BS$, образованных однократно отраженными МЛК, можно представить в следующем виде: $\tilde{\Phi}_{BN} = [\tilde{\Phi}_{BN}^{(1)}; \tilde{\Phi}_{BN}^{(2)}; \dots; \tilde{\Phi}_{BN}^{(L_N)}]$.

Вектор измеренных в локальной СК углов ухода AOD сигналов от UE на $l = 1, \dots, L_N$ отражателей N в условиях NLOS радиолоний $UE \rightarrow N$, образованных однократно отраженными МЛК, можно представить как $\tilde{\Phi}_{UN} = [\tilde{\Phi}_{UN}^{(1)}; \tilde{\Phi}_{UN}^{(2)}; \dots; \tilde{\Phi}_{UN}^{(L_N)}]$.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ в (6) содержит все неизвестные параметры: координаты $\mathbf{p}_U$ и ориентацию $\mathbf{o}_U$ UE, параметры канала, включая вектор амплитуд $\mathbf{p}$ и вектор фаз $\mathbf{\xi}$ комплексных коэффициентов прямого и / или отраженных лучей, координаты отражателей и сдвиг синхронизации в условиях LOS радиолоний $UE \rightarrow BS$. Для задач позиционирования непосредственный интерес представляет только вектор $\mathbf{s}_U$, включающий оценку координат $\mathbf{p}_U$ и ориентации $\mathbf{o}_U$ устройства UE.

Остальные параметры состояния образуют составной вектор $\mathbf{s}_N$ [2]:

$$\mathbf{s}_N = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B]. \quad (8)$$

НГКР для параметров вектора $\mathbf{s}_U$ может быть найдена из эквивалентной информационной матрицы Фишера (EFIM, аббр. от англ. Equivalent Fisher Information Matrix).

2.1.3. Однопозиционная оценка координат и ориентации в ближней зоне

В терагерцовом диапазоне однопозиционная оценка координат и ориентации рассматривается для модели NF с участием одной базовой станции, а также с участием одной RIS по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолониях $BS \leftrightarrow UE$, $BS \leftrightarrow RIS$, $RIS \leftrightarrow UE$. Условия NF обусловлены меньшей длиной волны, повышенной по сравнению с диапазоном ММВ размерностью AP, а также меньшей дальностью радиосвязи вследствие более высоких потерь PPB. Учет эффекта NF

реализуется переходом от модели плоского фронта волны (PWM, аббр. от англ. Plane Wave Model) к модели сферического фронта волны (SWM, аббр. от англ. Spherical Wave Model).

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U], \quad (9)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U; \mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B], \quad (10)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{t}; \Phi_{BU}; \Phi_{RU}; \Phi_{BN}; \Phi_{NU}; \mathbf{o}_U]. \quad (11)$$

Из сравнения (6 и 10) следует, что общее выражение вектора состояния $\mathbf{s}$ при позиционировании в диапазоне ММВ в дальней зоне и терагерцовом диапазоне в NF совпадают. Из сравнения (7 и 11) следует, что общее выражение вектора измерений $\mathbf{y}$ при позиционировании в диапазоне ММВ в дальней зоне и терагерцовом диапазоне в NF отличаются следующим образом: вектора углов AOA / AOD в локальной СК $\tilde{\Phi}$ в (7) заменяются на соответствующие вектора в глобальной СК Φ в (11); также в (11) включен вектор оценки ориентации UE $\mathbf{o}_U$. Вектора $\tilde{\Phi}_{UB}$, $\tilde{\Phi}_{UR}$, $\tilde{\Phi}_{UC}$ в принципе тоже можно было бы записать, однако получить непосредственные выражения для оценки их НГКР в условиях NF не представляется возможным. Это объясняется тем, что вычисление расстояний между антенными элементами для SWM зависит от глобальных координат, а не от углов прихода / ухода AOA / AOD в локальной СК, как следует из выражений для элементов $h_{L,bu}[k]$ b -й строки и u -го столбца канальной матрицы MIMO системы в условиях LOS $\mathbf{H}_L[k]$ [1], где отличие комплексных коэффициентов канала в SWM $h_{L,bu}^{SWM}[k]$ от PWM $h_{L,bu}^{PWM}[k]$ заключается в том, что принятые на различные антенные элементы сигналы имеют одинаковые амплитуды ρ_L , однако различные фазы ξ .

2.1.4. Одноэтапное позиционирование с непосредственной оптимизацией

При двухэтапном позиционировании на первом этапе выполняется оценка первичных дальномерных и / или УМ измерений, а на втором этапе извлекается оценка координат и ориентации в результате вторичной обработки TOA и / или AOA / AOD.

При одноэтапном позиционировании оценка координат и ориентации извлекается в результате непосредственной оптимизации целевой функции; при этом вектор измерений $\mathbf{y}_{\text{Direct}}$ равен вектору состояния $\mathbf{s}$ [3]:

$$\mathbf{y}_{\text{Direct}} = \mathbf{s}. \quad (12)$$

Следует отметить, что формализованные выше вектора состояния $\mathbf{s}$ и измерений $\mathbf{y}$ можно обобщить и включить дополнительные параметры для оценки, например, погрешности местоположения

и ориентации базовой станции и RIS, а также соответствующие сдвиги синхронизации. Однако для позиционирования эти дополнительные параметры не представляют непосредственного интереса и лишь увеличивают вычислительную сложность работы алгоритма локализации.

2.2. Оценка точности позиционирования по метрике НГКР

2.2.1. Понятие нижней границы Крамера – Рао

Для задач позиционирования UE непосредственный интерес представляет его точность оценок координат и ориентации. Точность оценки координат или погрешность позиционирования обычно измеряют среднеквадратической ошибкой (MSE, *аббр. от англ. Mean Squared Error*) или корнем из среднеквадратической ошибки (RMSE, *аббр. от англ. Root Mean Squared Error*).

Метрика RMSE представляет собой евклидово расстояние $d(\mathbf{p}_U, \hat{\mathbf{p}}_U)$ между истинным местоположением $\mathbf{p}_U = [x_U, y_U, z_U]^T$ и оценкой координат UE $\hat{\mathbf{p}}_U = [\hat{x}_U, \hat{y}_U, \hat{z}_U]^T$:

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_p &= d(\mathbf{p}_U, \hat{\mathbf{p}}_U) = \\ &= \sqrt{(x_U - \hat{x}_U)^2 + (y_U - \hat{y}_U)^2 + (z_U - \hat{z}_U)^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Точность оценки ориентации или погрешность поворота UE определяется евклидовым расстоянием $d(\mathbf{o}_U, \hat{\mathbf{o}}_U)$ между истинной ориентацией UE $\mathbf{o}_U = [\alpha_U, \beta_U, \gamma_U]^T$ и оценкой ориентации UE $\hat{\mathbf{o}}_U = [\hat{\alpha}_U, \hat{\beta}_U, \hat{\gamma}_U]^T$:

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_o &= d(\mathbf{o}_U, \hat{\mathbf{o}}_U) = \\ &= \sqrt{(\alpha_U - \hat{\alpha}_U)^2 + (\beta_U - \hat{\beta}_U)^2 + (\gamma_U - \hat{\gamma}_U)^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Погрешности оценки координат и ориентации зависят от уровня шума первичных измерений. Теоретические пределы точности геометрических методов позиционирования характеризуются метрикой нижней границы погрешности оценки координат (РЕВ, *аббр. от англ. Position Error Bound*) и метрикой нижней границы погрешности оценки ориентации (ОЕВ, *аббр. от англ. Orientation Error Bound*) [2]. Данные метрики извлекаются из НГКР и служат ориентиром для оценки эффективности работы различных алгоритмов позиционирования. Порядок вычисления НГКР для импульсных сигналов в домене времени подробно описан в [4, 5]. Анализ сигналов OFDM в домене частоты можно проводить аналогичным образом [2]. В диапазонах УКВ и ММВ обычно анализируются baseband-сигналы после понижающего преобразования частоты и оцифровки, из которых затем извлекаются первичные ДМ и УМ измерения. Спецификой позиционирования в терагерцовом диапазоне является то, что первичные измерения предпочтительнее извлекать непосредственно из ра-

диосигнала на несущей радиочастоте вследствие низкой энергетики радиоимпульсов ДММВ.

Далее выполняется формализация порядка оценки точности позиционирования на плоскости 2D и в пространстве 3D для сигналов OFDM на основе модели, описанной в [1]. Порядок оценки точности позиционирования на плоскости 2D в условиях LOS и NLOS для канала вниз BS → UE ранее был формализован в [6, 7]. Порядок оценки точности позиционирования в пространстве 3D для каналов «вниз» BS → UE и «вверх» UE → BS описан в [8–10]. Модели и методы позиционирования с использованием RIS [11–17] на сегодняшний день все еще находятся в стадии становления, однако уже показывают широкие возможности повышения точности оценок координат и ориентации. Использование влияния эффекта NF на позиционирование устройств исследовано в [18] и показало, как новые проблемы учета кривизны фронта волны при моделировании, так и новые возможности в части повышения точности ОК на малых расстояниях. При исследовании и разработке вопросов ОМП устройств в сетях 6G терагерцового диапазона учет новых факторов использования RIS, а также учет кривизны фронта волны и эффекта NF в радиолиниях BS ↔ UE, BS ↔ RIS, RIS ↔ UE является необходимостью. Помимо этого, новые модели и методы сетевого позиционирования должны также учитывать и организацию сверхбольшого числа элементов AP в AOSA на базовой станции. Далее приводится порядок оценки точности позиционирования по метрике НГКР, учитывающий перечисленные выше новые факторы, согласно [2].

2.2.2. Определение НГКР погрешности оценок координат и ориентации

Допустим, вектор принятого сигнала на k -й поднесущей ($k = 1, \dots, K$) при g -й ($g = 1, \dots, G$) передаче символа OFDM для модели канала цифровой MIMO системы в дальней зоне определяется выражением [1]:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{(g)}[k] &= \sqrt{P} \mathbf{H}[k] \mathbf{x}^{(g)}[k] + \mathbf{n}^{(g)}[k] = \\ &= \boldsymbol{\mu}^{(g)}[k] + \mathbf{n}^{(g)}[k], \end{aligned} \quad (15)$$

где P – средняя мощность переданного сигнала; $\boldsymbol{\mu}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$ – вектор принятого сигнала без учета вектора выборок аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) $\mathbf{n}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$; комплексные выборки $\mathbf{n}^{(g)}[k]$ имеют нормальное распределение $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 ; вектор переданного сигнала $\mathbf{x}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ выбирается при ограничении $\|\mathbf{x}^{(g)}[k]\|^2 = 1$; $\mathbf{H}[k]$ – канальная матрица k -й поднесущей.

При заданной модели принятого сигнала (15) и учете всех первичных измерений в векторе пара-

метров состояния канала $\mathbf{s}$ потенциальная точность оценок координат и ориентации по метрике НГКР одинакова как для одноэтапного, так и для двухэтапного позиционирования [3]. НГКР может быть вычислена не только для погрешности оценок $\hat{\mathbf{p}}_U$ и $\hat{\mathbf{o}}_U$, входящих в состав вектора состояния $\mathbf{s}_U$, но и для погрешности оценок первичных измерений, входящих в состав вектора измерений $\mathbf{y}$.

Обобщенное выражение для НГКР вектора состояния $\mathbf{s}$ можно представить следующим выражением:

$$\text{CRB} \triangleq [\mathbf{I}(\mathbf{s})]^{-1} = [\mathbf{J}_S^T \mathbf{I}(\mathbf{y}) \mathbf{J}_S]^{-1}, \quad (16)$$

где $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ – информационная матрица Фишера (FIM, аббр. от англ. Fisher Information Matrix) вектора состояния $\mathbf{s}$; $\mathbf{I}(\mathbf{y})$ – FIM вектора первичных измерений $\mathbf{y}$, определяемая в [2] как:

$$\mathbf{I}(\mathbf{y}) = \frac{2}{\sigma^2} \sum_g \sum_k \Re \left\{ \left(\frac{\partial \mu^{(g)}[k]}{\partial \mathbf{y}} \right)^H \left(\frac{\partial \mu^{(g)}[k]}{\partial \mathbf{y}} \right) \right\}; \quad (17)$$

$\mathbf{J}_S$ – матрица Якоби, или матрица частных производных функций $\mathbf{y}$ в точках $\mathbf{s}$, определяемая как:

$$\mathbf{J}_S \triangleq \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{s}}. \quad (18)$$

НГКР дает нижнюю границу для дисперсии оценки неизвестного параметра, выражая ее через FIM, поэтому из CRB в (16) **Ошибка! Источник ссылки не найден.** далее можем записать формулы для вычисления пределов РЕВ и ориентации ОЕВ [2]:

$$\text{РЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\text{CRB}]_{1:3,1:3})}, \quad (19)$$

$$\text{ОЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\text{CRB}]_{4:6,4:6})}, \quad (20)$$

где $\text{tr}\{\cdot\}$ – след матрицы; операция $\text{tr}([\text{CRB}]_{1:3,1:3})$ означает выбор составной матрицы из первых трех верхних строк (с 1 по 3) и трех левых столбцов (с 1 по 3) исходной матрицы CRB; $\text{tr}([\text{CRB}]_{4:6,4:6})$ означает выбор составной матрицы из трех нижних строк (с 4 по 6) и трех правых столбцов (с 4 по 6) матрицы CRB.

2.2.3. Определение эквивалентной информационной матрицы Фишера

FIM вектора состояния $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ содержит информацию обо всех параметрах канала, как показано в выражениях (3, 6, 10). Каждый элемент FIM $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ обозначается как $\mathbf{I}(\mathbf{s})_{i,j} = I(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j)$ и может быть вычислен по формулам (16–18); $i, j \leq \text{length}(\mathbf{s})$, где $\text{length}\{\cdot\}$ – оператор вычисления размера вектора. Если для позиционирования нужны только параметры оценки координат $\mathbf{p}_U$ и ориентации $\mathbf{o}_U$, т. е. интерес представляет лишь вектор $\mathbf{s}_U$, вместо полной FIM вычисляется EFIM.

Для этого структура исходной FIM вектора состояния $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ преобразуется в блочную диагональную форму согласно выражению [2]:

$$\mathbf{I}(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}(\mathbf{s}_U) & \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N) \\ \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)^T & \mathbf{I}(\mathbf{s}_N) \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где вектор состояния $\mathbf{s}_U$ содержит параметры UE, представляющие интерес для задач позиционирования, а вектор $\mathbf{s}_N$ – остальные параметры состояния из совокупного вектора $\mathbf{s} = \mathbf{s}_U \cup \mathbf{s}_N$ в (1); подразделение на векторы $\mathbf{s}_U$ и $\mathbf{s}_N$ подробно описано в [8].

EFIM вектора состояния $\mathbf{s}_U$ можно представить в виде выражения [2]:

$$\mathbf{I}^E(\mathbf{s}_U) = \mathbf{I}(\mathbf{s}_U) - \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N) \mathbf{I}(\mathbf{s}_N)^{-1} \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)^T, \quad (22)$$

где элемент $\mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)_{i,j} = I(\mathbf{s}_{U,i}, \mathbf{s}_{N,j})$, $i \leq \text{length}(\mathbf{s}_U)$, $j \leq \text{length}(\mathbf{s}_N)$; РЕВ и ОЕВ вычисляются из CRB по формулам (19 и 20), соответственно.

2.2.4. Нижняя граница Крамера – Рао погрешности оценки ориентации в дальней зоне

Вычисление ОЕВ по формулам (16–20) не позволяет извлечь искомую оценку в пространстве 3D в условиях дальней зоны, так как ориентация $\mathbf{o}_U$ в векторе состояния (6) не извлекается из первичных УМ измерений, собранных на приемной базовой станции и содержащихся в векторе измерений (7). В то же время пределы ОЕВ устройства можно оценить с использованием ограниченной НГКР из вектора углов ухода $\text{AOD } \tilde{\mathbf{\theta}} = [\tilde{\varphi}_{UB}; \tilde{\varphi}_{UR}; \tilde{\varphi}_{UN}]$, измеренных на передающем UE. Установлено, что неизвестный вектор $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^{N_\eta \times 1}$, располагающийся на поверхности функции неопределенности $\mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}) = 0$, определяется $0 \leq K_\eta \leq N_\eta$ ограничениями.

Тогда ограниченную НГКР можно представить выражением [19]:

$$\mathbf{I}_{\text{const}}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{M}(\mathbf{M}^T \mathbf{I}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T, \quad (23)$$

где $\mathbf{I}(\boldsymbol{\eta})$ – EFIM вектора параметров $\boldsymbol{\eta}$ без ограничений; $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times (N-K)}$ – ортонормированный базис для пространства градиентной матрицы $\partial \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}) / \partial \boldsymbol{\eta}^T$, удовлетворяющий условию $\mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{I}_{N-K}$.

Для оценки ориентации в дальней зоне матрицу $\mathbf{M}$ можно представить как [20]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\mathbf{r}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & -\mathbf{r}_3 & -\mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ и $\mathbf{r}_3$ – соответственно первый, второй и третий столбцы матрицы поворота $\mathbf{R}$ [1]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\gamma s_\alpha & s_\alpha s_\gamma + c_\alpha c_\gamma s_\beta \\ c_\beta s_\alpha & c_\alpha c_\gamma + s_\alpha s_\beta s_\gamma & c_\gamma s_\alpha s_\beta - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где использованы следующие обозначения:

$$c_\alpha = \cos(\alpha_Q), \quad s_\alpha = \sin(\alpha_Q), \quad (26)$$

$$c_\beta = \cos(\beta_Q), s_\beta = \sin(\beta_Q), \quad (27)$$

$$c_\gamma = \cos(\gamma_Q), s_\gamma = \sin(\gamma_Q). \quad (28)$$

Столбцы матрицы поворота $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ и нулевой вектор $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ можно представить выражениями:

$$\mathbf{r}_1 = [c_\alpha c_\beta, c_\beta s_\alpha, -s_\beta]^T, \quad (29)$$

$$\mathbf{r}_2 = [c_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\gamma s_\alpha, c_\alpha c_\gamma + s_\alpha s_\beta s_\gamma, c_\beta s_\gamma]^T, \quad (30)$$

$$\mathbf{r}_3 = [s_\alpha s_\gamma + c_\alpha c_\gamma s_\beta, c_\gamma s_\alpha s_\beta - c_\alpha s_\gamma, c_\beta c_\gamma]^T, \quad (31)$$

$$\mathbf{0}_{3 \times 1} = [0, 0, 0]^T. \quad (32)$$

Сформировав составной вектор $\mathbf{r} = \text{vec}(\mathbf{R}) = [\mathbf{r}_1; \mathbf{r}_2; \mathbf{r}_3]$, запишем FIM вектора $\mathbf{I}(\mathbf{r})$ поворота через FIM вектора первичных измерений углов ухода AOD $\mathbf{I}(\tilde{\boldsymbol{\theta}})$ [2]:

$$\mathbf{I}(\mathbf{r}) = \left[\left(\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^T \mathbf{I}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}) \left(\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}}{\partial \mathbf{r}} \right) \right]. \quad (33)$$

Тогда нижняя граница погрешности оценки ориентации ОЕВ равна [2]:

$$\text{ОЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\mathbf{I}_{\text{constr}}(\boldsymbol{\eta})]^{-1})}. \quad (34)$$

Метрика ОЕВ в (34) вычисляется с использованием уточненной матрицы поворота $\|\mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}\|_F$ и отличается от (20) тем, что использует разностные углы Эйлера $\|\mathbf{o} - \hat{\mathbf{o}}\|$. Однако для характеристики точности ориентации могут использоваться обе формулы (20 и 34). Полученные выражения для вычисления пределов РЕВ и ОЕВ позволяют сравнивать эффективность различных алгоритмов позиционирования.

2.2.5. Нижняя граница Крамера – Рао погрешности оценок координат и ориентации в условиях наличия прямой видимости

Записать аналитическое выражение для оценки НГКР при условии учета LOS и всех отраженных NLOS лучей достаточно проблематично, однако можно формализовать РЕВ и ОЕВ в сценарии LOS для условий сбора первичных ДМ и УМ измерений в радиолинии UE → BS по единственному лучу LOS.

Для сценария позиционирования на плоскости 2D в условиях идеальной синхронизации ($B = 0$) такие оценки получены в [8, 9]:

$$\text{РЕВ}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{N_0 W d^2}{N_B N_U G P \lambda^2} \left(\frac{c^2 \zeta_{\tau_{BU}}}{W^2} + \frac{d^2 \zeta_{\phi_{BU}}}{N_B^2} \right)}, \quad (35)$$

$$\text{ОЕВ}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{N_0 W d^2}{N_B N_U G P \lambda^2} \left(\frac{\zeta_{\phi_{BU}}}{N_B^2} + \frac{\zeta_{\phi_{UB}}}{N_U^2} \right)}, \quad (36)$$

где компоненты $\zeta_{\tau_{BU}}, \zeta_{\phi_{BU}}$ и $\zeta_{\phi_{UB}}$ – составляющие погрешности первичных измерений времени TOA,

угла прихода AOA и угла ухода AOD сигнала по единственному лучу LOS в радиолинии UE → BS.

Одинаковый множитель под знаком корня показывает зависимость от отношения сигнал / шум (SNR, *аббр. от англ.* Signal to Noise Ratio) и содержит следующие параметры:

- мощность шума ($N_0 W$);
- показатель потерь PPB $(d/\lambda)^2$ в свободном пространстве в зависимости от расстояния d и длины волны λ ;
- число элементов AP на базовой станции N_B и UE N_U ;
- число передач G и мощность передачи P .

Анализ выражения (35) показывает, что РЕВ определяется погрешностью первичных измерений задержки TOA $\zeta_{\tau_{BU}}$ и угла прихода AOA $\zeta_{\phi_{BU}}$; снизить влияние погрешности первичных ДМ и УМ измерений на базовой станции можно за счет увеличения ширины полосы частот W и размерности AP базовой станции N_B . Анализ (36) показывает, что ОЕВ определяется погрешностью первичных измерений угла прихода AOA $\zeta_{\phi_{BU}}$ и ухода AOD $\zeta_{\phi_{UB}}$ сигнала; снизить влияние погрешности первичных УМ измерений на базовой станции и UE можно за счет увеличения размерности AP на базовой станции N_B и устройстве N_U .

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе приводится обзор геометрических алгоритмов позиционирования с одноэтапной и двухэтапной обработкой первичных измерений. При одноэтапном позиционировании (direct localization) оценка координат и ориентации получается в результате непосредственной оптимизации целевой функции первичных ДМ и УМ измерений. При двухэтапном позиционировании (multi-stage) оценка координат и ориентации получается в результате вторичной обработки времени TOA и угла прихода / ухода AOA / AOD сигнала: первичные измерения TOA и AOA / AOD задают линии (в 2D) или поверхностей (в 3D) положения, а их пересечение определяет искомую оценку координат и ориентации. Помимо геометрического, рассматриваются алгоритмы позиционирования на основе обучения, включая кооперативное позиционирование, отслеживание, а также способ одновременной локализации и построения карты SLAM. Рисунок 1 иллюстрирует укрупненные категории алгоритмов позиционирования и номер раздела, в котором выполняется их обзор.

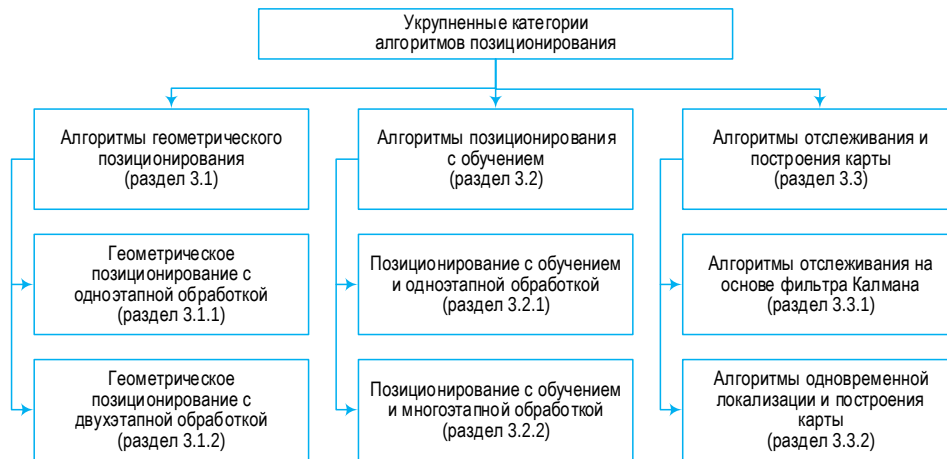


Рис. 1. Укрупненные категории алгоритмов позиционирования

Fig. 1. Enlarged Categories of Positioning Algorithms

3.1. Алгоритмы геометрического позиционирования в сетях 6G

3.1.1. Геометрическое позиционирование с одноэтапной обработкой

Алгоритмы геометрического позиционирования можно разделить на алгоритмы с одноэтапной и многоэтапной обработкой. В алгоритмах с одноэтапной обработкой вектор состояния $\mathbf{s}$ оценивается непосредственно из вектора принятого сигнала $\mathbf{y}^{(g)}[k]$ в (15), минуя этап обработки первичных измерений [3, 21]. Допустим, на приеме доступен вектор $\hat{\mathbf{y}} = \text{vec}(\mathbf{y}^{(g)}[k])$ оценки принятого сигнала по набору из $k = 1, \dots, K$ поднесущих и $g = 1, \dots, G$ передач, а информация о предыдущем состоянии и местоположении UE недоступна. Тогда алгоритм геометрического позиционирования с одноэтапной обработкой можно формализовать выражением максимизации следующей функции правдоподобия [2]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{\text{direct}} &= \arg \max_{\mathbf{s}} p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s}) = \arg \max_{\mathbf{s}} \ln(p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s})) = \\ &= \arg \min_{\mathbf{s}} [(\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{s}))^H \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}^{-1} (\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{s}))], \end{aligned} \quad (37)$$

где $\boldsymbol{\mu} = \text{vec}(\boldsymbol{\mu}^{(g)}[k])$ – вектор принятого сигнала без учета выборок АБГШ по набору из $k = 1, \dots, K$ поднесущих и $g = 1, \dots, G$ передач; $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}$ – ковариационная матрица вектора принятых сигналов $\hat{\mathbf{y}}$, которую можно исключить при условии независимых одинаково распределенных выборок АБГШ в (15) на различных элементах АР, поднесущих и передачах.

Обобщенный алгоритм геометрического позиционирования с одноэтапной обработкой (37) можно использовать как в сценарии квази-синхронных радиотрасс UE $\leftrightarrow$ BS, когда синхронизированы только базовые станции, так и в асинхронном сценарии, когда синхронизация отсутствует как в радиотрассах UE $\leftrightarrow$ BS, так и между

BS [2]. Однако вычислительная сложность оптимизационной задачи в (37) чрезвычайно высока вследствие невыпуклой целевой функции и широкого пространства поиска. Для сужения области поиска может быть использована информация о предыдущем состоянии и местоположении UE.

3.1.2. Геометрическое позиционирование с двухэтапной обработкой

В алгоритмах с двухэтапной обработкой выделяют этап извлечения геометрических параметров первичных ДМ / УМ измерений и этап вторичной обработки первичных ДМ / УМ измерений с оценкой координат и ориентации UE. Разделение на два этапа позволяет снизить вычислительную сложность алгоритма позиционирования. В двухэтапном алгоритме из принятого сигнала сначала извлекается вектор первичных измерений $\hat{\mathbf{y}}$, а затем на его основе выполняется вычисление вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_U$, включающего искомую оценку координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ и ориентации $\hat{\mathbf{d}}_U$ UE [6, 7].

Алгоритм геометрического позиционирования с двухэтапной обработкой можно формализовать выражением максимизации следующей целевой функции [2]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{\text{multi-stage}} &= \arg \max_{\mathbf{s}} p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s}) = \\ &= \arg \min_{\mathbf{s}} [(\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{s}))^H \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}^{-1} (\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{s}))], \end{aligned} \quad (38)$$

где $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}$ – ковариационная матрица вектора измерений $\hat{\mathbf{y}}$; первичные измерения в составе вектора $\hat{\mathbf{y}}$ извлекаются из оценки принятого сигнала $\hat{\mathbf{y}}$.

Алгоритм двухэтапной обработки по своей сути является субоптимальным [3] и обычно уступает по точности алгоритму с одноэтапной обработкой. Однако учет МЛК, вычислительно сложный в реализации за один этап, позволяет алгоритму с двухэтапной обработкой приблизиться к точности алгоритма с одноэтапной обработкой, что подтвер-

ждается оценками точности в [6, 7]. Пример практической реализации алгоритма сжатого зондирования при оценке углов прихода / ухода, иллюстрирующий геометрическое позиционирование с двухэтапной обработкой, рассмотрен в [22].

Извлечение первичных дальномерных ТОА, угломерных АОА / АОД и других измерений для каждой компоненты прямого и отраженных лучей в составе вектора $\hat{\mathbf{y}}$ может выполняться как совместно, так и по отдельности. Например, оценка амплитудных коэффициентов канала может быть выполнена методом наименьших квадратов. Определение углов прихода / ухода АОА / АОД сигналов может выполняться методом анализа подпространств MUSIC (аббр. от англ. Multiple Signal Classification) [23], сжатого зондирования [24] и глубокого обучения [25]. Определение задержек прихода ТОА сигналов может выполняться методом корреляционного [26] или энергетического [27] анализа. Параметры канала можно также оценить и совместно с использованием многомерного анализа методом MD-ESPRIT (аббр. от англ. Multi-Dimensional Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) [28]. Точность сбора УМ измерений АОА и АОД определяется, в первую очередь, размерностью АР на базовой станции и UE, а точность сбора ДМ измерений ТОА определяется, в первую очередь, шириной полосы частот и начальными условиями синхронизации в радиолинии BS $\leftrightarrow$ UE. Особенностью позиционирования с двухэтапной обработкой является то, что погрешности первичных измерений на первом этапе снижают результирующую точность оценок координат и ориентации в результате вторичной обработки на втором этапе, поэтому в двухэтапных алгоритмах следует предусматривать механизмы компенсации.

3.1.2. Практическая реализация геометрических алгоритмов

Аналитическое решение задачи геометрического позиционирования с двухэтапной обработкой может быть получено путем приравнивания производной целевой функции (38) к нулю и нахождения неизвестной оценки координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ и ориентации $\hat{\mathbf{b}}_U$ UE. Однако данный подход непрактичен вследствие того, что целевая функция в (38) не является выпуклой. На практике используют два типа алгоритмов оптимизации: конвергентные итерационные и эвристические [29].

Принцип работы конвергентных итерационных алгоритмов основан на том, что при известной из модели сигнала информации о градиенте можно реализовать алгоритмы на основе градиента (т. е. вектора, указывающего направление наискорейшего роста некоторой скалярной величины) или Гессiana (Гессиян функции – симметрическая

квадратичная форма, описывающая поведение функции во втором порядке). За несколько итераций конвергентные алгоритмы сходятся к оптимуму целевой функции. Сходимость зависит от критериев оптимизации целевой функции и параметров итеративного поиска, например, размера шага, при которых могут быть достигнуты локальные решения.

Принцип работы эвристических алгоритмов основан на оптимизации недифференцируемых нелинейных целевых функций и более быстром нахождении субоптимальных решений. Популярные алгоритмы включают роевой интеллект и генетические алгоритмы [2]. В связи с достаточно большим числом первичных измерений вследствие высокой размерности АР и широкой полосы сигнала, а также принимая во внимание свойство разряженности радиоканала диапазона ММВ и ТГц-волн предпочтительным с вычислительной точки зрения является позиционирование с двухэтапной обработкой. Однако в сценариях, где необходима максимально возможная точность, целесообразно сначала оценить область поиска координат и ориентации алгоритмом двухэтапной обработки, а затем в этой области выполнить повторный поиск с одноэтапной обработкой.

3.2. Алгоритмы позиционирования с обучением

В сложных условиях РРВ при наличии большого числа не разрешаемых в домене времени МЛК, а также при невозможности реализации алгоритмов геометрического позиционирования в реальном времени могут использоваться алгоритмы с обучением. В настоящем разделе рассмотрим особенности практической реализации алгоритмов позиционирования с машинным обучением (ML, аббр. от англ. Machine Learning). Данные алгоритмы, как и геометрические, подразделяются на ML-позиционирование с одноэтапной и двухэтапной обработкой.

3.2.1. Позиционирование с обучением и одноэтапной обработкой

Обобщенный алгоритм позиционирования с обучением включает две фазы: предварительное оффлайн-обучение модели $f(\cdot)$ и онлайн-обработку наблюдений $\mathbf{y}$, в результате которой получается оценка координат и ориентации $\hat{\mathbf{p}} = f(\mathbf{y})$. На этапе обучения необходимо сформировать набор обучающих данных $\mathcal{D} = \langle \mathcal{D}_y, \mathcal{D}_p \rangle$ для обучения модели – оптимизации параметров функции $f(\cdot)$ по критерию минимизации функции потерь:

$$\mathcal{L}(f(\mathbf{y}^{\text{train}}), \mathbf{p}^{\text{train}}).$$

Набор обучающих данных включает наборы пар сигнал-местоположение $\langle \mathbf{y}_i^{\text{train}}, \mathbf{p}_i^{\text{train}} \rangle$, задающих соотношение между i -м наблюдением $\mathbf{y}_i^{\text{train}}$ и i -й

оценкой координат и ориентации $\mathbf{p}_i^{\text{train}}$, где $1 \leq i \leq |\mathcal{D}|$, $\mathbf{y}_i^{\text{train}} \in \mathcal{D}_y$, $\mathbf{p}_i^{\text{train}} \in \mathcal{D}_p$.

Используя в качестве критерия оптимизации целевой минимум среднеквадратического отклонения, получим выражение [2]:

$$\mathcal{L}(f(\mathcal{D}_y), \mathcal{D}_p) = \sum_i^{|\mathcal{D}|} \|f(\mathbf{p}_i^{\text{train}}) - \mathbf{p}_i^{\text{train}}\|^2. \quad (39)$$

После обучения модель $f(\cdot)$ может использоваться для извлечения непосредственной оценки координат и ориентации $\hat{\mathbf{p}}$ из собранных наблюдений $\mathbf{y}$.

Подход анализа на соответствие шаблону использует базу данных предварительно записанных шаблонов-измерений с известными местоположениями для поиска наилучшего соответствия между текущим собранным измерением и предварительно записанным в базу данных. При нахождении наилучшего соответствия текущему измерению ставится в соответствие записанное в базу местоположение. В качестве первичных измерений может выступать информация о состоянии канала (CSI, аббр. от англ. Channel State Information), включающая, например, уровни мощности принимаемого сигнала (RSS, аббр. от англ. Received Signal Strength). Сбор и обработка CSI, как правило, требует больших накладных расходов и вычислительной сложности, а измерения RSS обычно не обеспечивают высокой точности позиционирования. Одним из измеряемых параметров канала, обеспечивающим компромисс между точностью позиционирования, накладными расходами и вычислительной сложностью является SNR в заданных пространственных лучах [30]. Для извлечения местоположения из наблюдений могут также использоваться модели и методы глубоких нейронных сетей (DNN, аббр. от англ. Deep Neural Networks) и сверточных нейронных сетей (CNN, аббр. от англ. Convolutional Neural Networks) [31]. Позиционирование с обучением и одноэтапной обработкой обеспечивает высокую точность только тогда, когда сценарий онлайн ОМП соответствует тому, в котором выполнено предварительное оффлайн-обучение; поэтому недостатком такого позиционирования является зависимость результирующей точности оценки координат от набора данных, на которых выполнено обучение.

3.2.2. Позиционирование с обучением и многоэтапной обработкой

Как и в случае алгоритмов геометрического ОМП, позиционирование с обучением может быть реализовано в несколько этапов, например: предварительная обработка принятого сигнала, извлечение геометрических параметров из первичных измерений и результирующая оценка координат и ориентации. Каждый из данных этапов может выпол-

няться методами и средствами ML со значительно меньшим объемом набора обучающих данных.

На первом этапе методы ML могут быть использованы для снижения эффектов несовершенства оборудования, например, ошибок расположения антенных элементов [32], дисбаланса синфазной и квадратурной составляющих [33], взаимной связи антенных элементов [34], а также нелинейности усилителя мощности [35]. Принятый искаженный вследствие несовершенства оборудования сигнал может быть компенсирован и восстановлен на начальном этапе предварительной обработки.

На следующем этапе извлечения геометрических параметров из первичных измерений методы ML могут быть использованы для оценки угла DOA [36, 37] и задержки TOA [38, 39] прихода сигнала.

На заключительном этапе оценки координат методы ML могут быть использованы для повышения точности позиционирования посредством идентификации МЛК в условиях NLOS [40] и последующего комплексирования [41].

Принимая во внимание сложность и разнообразность сценариев, а также высокую размерность наборов данных для обучения, реализация ML позиционирования с одноэтапной обработкой представляется непрактичной. В тоже время обучение модели $f(\cdot)$ для составных этапов при заданных параметрах может существенно снизить вычислительную сложность реализации ML-алгоритма позиционирования. Недостатком этого является то, что обученная модель для MIMO системы будет работать только для нее и не подойдет для MISO системы. Также при многоэтапной обработке необходимо учитывать накопление ошибок на каждом из этапов.

3.2.3. Классификация алгоритмов с обучением

ML-алгоритмы обычно классифицируют на контролируемое обучение, или обучение с учителем, используемое для решения задач классификации и регрессии; и неконтролируемое обучение, или обучение без учителя, используемое для кластеризации данных [42]. Другие подходы, включая полуконтролируемое обучение, обучение с подкреплением, трансферное и федеративное обучение, предназначены для решения задач, с которыми сталкиваются контролируемые и неконтролируемые алгоритмы обучения.

Алгоритмы контролируемого обучения включают методы случайного леса, опорных векторов и глубокого обучения. Вследствие их широкого применения в различных областях разработаны инструменты их реализации, однако на практике они сталкиваются с двумя проблемами [2]. Одна заключается в сборе данных на этапе обучения, когда реальные данные собрать затруднительно, а

синтезированные данные не позволяют достичь требуемой точности. Другая заключается в выборе параметров модели, например, количество слоев и нейронов.

Алгоритмы неконтролируемого обучения широко используются в задачах кластеризации и снижения размерности (или извлечения признаков), так как не требуют предварительно размеченных наборов данных. Пример реализации такого алгоритма, называемого диаграммой канала, предложен в [43] и заключается в изучении состояния канала CSI полностью неконтролируемым образом с последующим отображением многомерного набора параметров канала (с большим числом точек) на маломерную диаграмму канала (с малым числом точек). Данный прием может использоваться только на этапе предварительной обработки принятого сигнала [2].

Алгоритмы полуконтролируемого обучения совмещают принципы работы описанных выше алгоритмов и позволяют выполнить обучение модели на основе частично размеченного набора данных $\mathcal{D}$, когда $|\mathcal{D}_p| \ll |\mathcal{D}_u|$. Для сценария без явно формализованной целевой функции предпочтительным является обучение с подкреплением на основе собранных наблюдений в режиме онлайн. Трансферное обучение целесообразно использовать при существующей модели $f(\cdot)$ для снижения времени ее обучения, а федеративное обучение работает в распределенном режиме и повышает конфиденциальность пользователя.

В заключение отметим следующее. С одной стороны, радиоканал терагерцового диапазона является более детерминированным, чем радиоканал диапазона УКВ и ММВ вследствие более высоких потерь РРВ и меньшего числа различных МЛК, поэтому больше подходит для использования алгоритмов геометрического позиционирования. С другой стороны, радиоканал терагерцового диапазона характеризуется гораздо более широкой полосой частот и, следовательно, значительно большим объемом выборки принимаемых сигналов, для своевременной обработки которых в режиме реального времени на этапе извлечения параметров из первичных измерений целесообразно применение именно ML-алгоритмы. Более того, их использование оправдано для снижения эффектов несовершенства оборудования, существенно проявляющихся в терагерцовом диапазоне.

3.3. Алгоритмы отслеживания и построения карты в сетях 6G

Настоящее исследование посвящено позиционированию на основе сделанной в данный момент времени выборки текущих измерений. Однако данный подход к ОМП является составной частью

более общего класса задач отслеживания подвижных объектов, в которых оценка координат в данный момент времени определяется не только текущими измерениями, но и моделью предыдущего состояния объекта.

3.3.1. Алгоритмы отслеживания на основе фильтра Калмана

В сценарии отслеживания UE сбор первичных измерений необходим для инициализации модели состояния устройства, после чего оценка координат извлекается уже в режиме отслеживания. Математически сценарий отслеживания UE можно формализовать следующими выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_{U,t} \sim p(\mathbf{s}_{U,t} | \mathbf{s}_{U,t-1}), \quad (40)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_t \sim p(\mathbf{y}_t | \mathbf{s}_{U,t}), \quad (41)$$

где $\mathbf{s}_{U,t}$ – вектор состояния UE в момент времени t , который зависит от вектора состояния UE $\mathbf{s}_{U,t-1}$ в предыдущий момент времени согласно модели движения устройства; $\hat{\mathbf{y}}_t$ – вектор измерений в момент времени t , определяемый выражениями (4, 7, 11), который зависит от вектора состояния UE $\mathbf{s}_{U,t}$ в момент времени t .

Наблюдения образованы задержками TOA, а также углами прихода / ухода AOA / AOD сигналов LOS и отраженных от RIS. Сценарий отслеживания инициализируется начальным состоянием $p(\mathbf{s}_{U,0})$, которое должно быть известно. Обобщенное решение задачи отслеживания сводится к оценке апостериорного состояния $p(\mathbf{s}_{U,t} | \hat{\mathbf{y}}_{1:t})$ с учетом всех собранных измерений до текущего момента времени t . Для решения задачи отслеживания на практике используются различные фильтры, в том числе фильтры Калмана [44–46], которые дают аппроксимацию оценки координат UE. Если сделать допущение о том, что модель движения устройства и модель измерений линейны и подчиняются нормальному закону, то оценка координат получится несмещенной.

Фильтры Калмана обеспечивают рекурсивное решение задачи отслеживания. В сценариях нелинейной модели движения или сбора измерений на практике используется расширенный фильтр Калмана, который аппроксимирует нелинейные модели наблюдений и состояния с помощью линеаризации посредством разложения в ряд Тейлора. Другими разновидностями фильтров Калмана являются сигма-точечный фильтр Калмана, который используется там, где простая линеаризация приводит к уничтожению полезных связей между компонентами вектора состояния. В этом случае «линеаризация» основана на сигма-точечном преобразовании.

Другим распространенным для решения задач отслеживания инструментом являются так назы-

ваемые фильтры частиц [47] или многочастичные фильтры, которые реализуют рекурсивный алгоритм численного решения проблем оценивания для нелинейных и негауссовских случаев. В сравнении с расширенным фильтром Калмана, фильтры частиц не зависят от методов линеаризации или аппроксимации, однако более требовательны к вычислительным ресурсам.

3.3.2. Алгоритмы одновременной локализации и построения карты

Алгоритмы одновременной локализации и построения карты SLAM используются в подвижных UE для построения карты в заранее неизвестном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути. Актуальность SLAM связана с тем, что карты, используемые для позиционирования UE, обычно отражают пространство, зафиксированное в момент их построения, и которое может быть уже не актуально на момент текущего ОМП. Алгоритмы SLAM объединяют два независимых процесса в непрерывный цикл последовательных вычислений, при этом результаты одного процесса участвуют в вычислениях другого.

Принцип работы SLAM основан на том, что измерения $\hat{\mathbf{y}}_t$ в текущий момент времени t могут служить не только для оценки координат UE, но также и для ОМП отражателей SP (Scattering Points) в пространстве, совокупность которых и образует карту [48, 49]. Знание координат отражателей, в свою очередь, может повысить точность позиционирования самого UE. Системы SLAM можно разделить на две укрупненные категории: те, что используют инфраструктуру [50], и те, что ее не используют [51]. В системах SLAM, основанных на инфраструктуре, для оценки координат UE и SP используются сигналы, передаваемые базовыми станциями. Без базовых станций UE само передает зондирующие сигналы и затем само же их принимает и обрабатывает. Сложность в данном случае заключается в поиске соответствия между первичными измерениями времени TOA и угла прихода / ухода AOA / AOD сигналов и потенциальными местоположениями отражателей SP в пространстве.

Для реализации алгоритмов SLAM применительно к модели позиционирования в терагерцовом диапазоне [1] необходимо выразить коэффициенты канальной матрицы $\mathbf{H}_N^{(l)}$ для l -й МЛК в условиях NLOS через координаты $\mathbf{p}_N^{(l)}$ l -го отражателя SP. Затем следует поставить в соответствие измерения задержек и углов в локальной и глобальной СК из вектора измерений $\hat{\mathbf{y}}_t$ местоположениям SP и выполнить их ранжирование согласно оценкам правдоподобия. Реализация алгоритмов SLAM в терагерцовом диапазоне достаточно

затруднительна вследствие необходимости использования узких лучей при передаче и приеме. Для различных сценариев мобильности UE может потребоваться адаптация ширины луча по уровню половинной мощности HPBW (*аббр. от англ. Half Power Beam Width*) [52].

На сегодняшний день известно о достижении дециметровой точности в комплексированной системе высокоточной системы позиционирования локомотивов с использованием цифровых карт местности (<https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyy-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya>).

4. ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 6G

Оптимизация систем сетевого позиционирования 6G служит для достижения потенциальной точности оценок координат и ориентации UE при заданных ограничениях. В настоящем разделе выполняется постановка задачи оптимизации, а затем рассматриваются сценарии оффлайн и онлайн оптимизации систем сетевого позиционирования 6G.

4.1. Задача оптимизации систем сетевого позиционирования 6G

4.1.1. Постановка задачи

При построении и функционировании систем радиосвязи решают задачи их оптимизации с целью минимизации отношения сигнал / (шум + помеха) – SINR, *аббр. от англ. Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*, – максимизации энергоэффективности, пропускной способности и т. д. При построении и функционировании систем позиционирования очевидным критерием оптимизации является минимизация РЕВ и ОЕВ. В некоторых сценариях ОМП приоритетными могут быть и другие (помимо точности) критерии оптимизации. При построении и функционировании систем сетевого позиционирования следует учитывать то, что сеть 6G решает как задачи связи, так и задачи навигации, используя единый радиоинтерфейс, поэтому вероятно потребуется поиск компромисса между противоречивыми требованиями.

Для технологий сетевого позиционирования 4G LTE [53] и 5G NR [54, 55], работающих в диапазоне УКВ с выделенными опорными сигналами позиционирования, которые широкоэмитивно излучаются базовыми станциями, оптимизация системы выполняется преимущественно оффлайн. Объектом оптимизации в системе сетевого позиционирования диапазона УКВ являются местоположения базовых станций, которые определяют геометрический фактор снижения точности GDOP (*аббр. от англ. Geometric Dilution of Precision*) [56], а также конфигурация AP на базовых станциях.

GDOP связывает точность первичных измерений с точностью оценок координат [57]. Отметим, что для различных методов позиционирования искомая по критерию минимума GDOP топология базовых станций будет отличаться [58], а минимальный GDOP обеспечивается при комбинировании ДМ и УМ измерений [59].

Для технологий сетевого позиционирования 5G NR, работающих в диапазоне ММВ, точность ОМП зависит, в первую очередь, от пространственного разрешения углов прихода/ухода сигналов и определяется процедурами управления лучом на этапе установления и ведения радиосвязи [52]. Для повышения эффективности выравнивания лучей по критериям скорости и точности передатчику необходимо предварительно знать угловое расположение приемника, а приемнику – угловое расположение передатчика, т.е. необходимо выполнить предварительное выравнивание лучей. Диапазон углов расположения становится известен передатчику и приемнику после успешного выполнения грубого сканирования широкими лучами на этапе начального установления соединения и более узкими лучами на этапе уточнения при ведении связи [52]. Для реализации процедур выравнивания лучей используются матрицы прекодирования на передаче и матрицы комбинирования на приеме. Оптимизация этих матриц может производиться в режиме онлайн [2].

Для технологий сетевого позиционирования 6G, работающих в терагерцовом диапазоне, установление и ведение радиосвязи осуществляется еще более узкими лучами, чем в диапазоне ММВ, поэтому описанная выше задача онлайн-оптимизации весовых матриц пространственной обработки сигналов на передаче (прекодирование) и приеме (комбинирование) остается актуальной.

Математическая формализация матриц прекодирования и комбинирования представлена в пояснении к формуле (49) первой части исследования [1]. Осложняется данная задача тем, что решать ее приходится уже не для единого массива из отдельных элементов, выход каждого из которых связан с отдельным аналоговым RFC, а AOSA, образованного из SA. Если в диапазоне ММВ оптимизация матриц выполняется на уровне отдельных антенных элементов, то в терагерцовом диапазоне каждый RFC соответствует отдельному подмассиву SA, поэтому оптимизация выполняется дополнительно и на уровне каждого SA. Также в сетях 6G используются RIS, поэтому дополнительным объектом оптимизации становятся их отражающие коэффициенты.

4.1.2. Формализация задачи

Формализация задачи оптимизации зависит от критериев и сценария, в котором работает система

сетевого позиционирования. В качестве критерия, помимо точности [60], может быть радиопокрытие, задержка, энергопотребление, частота обновления оценки координат [61]. Зачастую различные критерии являются противоречивыми и требуют поиска компромисса. Например, увеличение радиопокрытия влечет за собой рост задержки, а повышение частоты обновления оценок координат может привести к снижению их точности [44, 45]. Задача оптимизации системы позиционирования при заданных ограничениях может быть как однокритериальной, так и многокритериальной. Обобщенная задача оптимизации системы позиционирования 6G терагерцового диапазона включает целевую функцию $f(V)$, функцию ограничений $g(V)$ и может быть формализована в виде выражения [2]:

$$V = \arg \min_V f(V) \text{ при } g(V) \leq 0, \quad (42)$$

где V – набор переменных, которые выбираются из L_Q субъектов $Q \in \{B, R, U\}$: местоположения p_Q , число элементов в массиве N_Q и подмассиве N'_Q AP, разнос элементов Δ' и подмассивов Δ AP, углы ДО ϕ' , коэффициенты RIS Ω , число передач ζ и др. Обычно рассматривается задача многокритериальной оптимизации при нескольких ограничениях, когда и целевая функция $f(V)$ и функция ограничений $g(V)$ образованы наборами параметров.

Целевая функция $f(V)$ зависит от предъявляемых к системе сетевого позиционирования требований [1], а функция ограничений $g(V)$ задает область поиска параметров оптимизации. В зависимости от сценария позиционирования заданный параметр может выступать как целевым критерием оптимизации, так и ограничением. Например, точность оценок координат по метрике РЕВ может выступать целевым критерием оптимизации; также РЕВ может выступать ограничением, например, служить максимально допустимой погрешностью оценки координат при оптимизации по критерию энергопотребления сетевого устройства. Таблица 1 содержит критерии и параметры оптимизации систем сетевого позиционирования для режимов оффлайн и онлайн, а также влияние параметров на критерии [2].

Под кодовой книгой лучей (см. таблицу 1) понимается предварительно заданный набор матриц пространственной обработки сигналов на передаче (прекодирование) и приеме (комбинирование); каждой матрице соответствует свой луч. Под периодом и числом передач – конфигурация сигналов, по которым выполняются первичные измерения. Порядок конфигурации опорных сигналов позиционирования, включая период и число их передач для выполнения сеанса позиционирования, описан в [54, 55].

ТАБЛИЦА 1. Критерии и параметры оптимизации сетевого позиционирования

TABLE 1. Criteria and Parameters for Network Positioning Optimization

Режим	Критерии / параметры	Переменные	Точность	Покрытие	Задержка	Частота обновления	Стабильность	Масштабируемость	Мобильность	Сложность
Оффлайн	число и МП BS, RIS	L_Q, p_Q	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓
	размерность AP	N_Q, N'_Q	✓	✓		–	–	✓	–	✓
	направленность AP	G_0	✓	✓	✓	–	–	–	–	–
	квантование	Q	✓	–	–	–	–	–	–	✓
	кодовая книга	C	–	✓	✓	–	–	✓	–	–
Онлайн	период, число передач	T, G	✓		–	✓	✓	✓	✓	–
	ширина полосы	B, K	✓	✓	–	✓	–	✓	✓	✓
	мощность	P, s	✓	✓	–	–	✓	✓	–	–
	углы ДО	φ'	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	–
	коэффициенты RIS	Ω	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	–

Примечание: МП BS – местоположение базовых станций

4.2. Сценарии оптимизации систем сетевого позиционирования

При построении и функционировании системы сетевого позиционирования 6G следует учитывать следующие сценарии и средства [61]:

- топология и структура сети;
- стратегии кооперативного ОМП;
- возможности аппаратного обеспечения базовых станций и UE;
- используемые сигналы для сбора первичных измерений.

4.2.1. Топология и структура

В первой части исследования [1] была формализована модель позиционирования в сетях 6G при наличии на приеме UE компоненты LOS от одной базовой станции [62], нескольких отраженных от препятствий SP МЛК в условиях NLOS [63] и отраженных от RIS-компонент. В условиях построения и функционирования сверхплотных терагерцевых сетей 6G в сеансе позиционирования может участвовать несколько базовых станций, RIS и UE, число которых равно L_B , L_R и L_U , соответственно. В таком случае система сетевого позиционирования может характеризоваться централизованной, распределенной и кластерной топологией. Кластерная топология свойственна наносетям ближнего радиуса действия, в которых критически важна энергоэффективность. Централизованная и распределенная топология характерна для сценариев микросот сверхплотных сетей 5G [61] и B5G / 6G. Централизованная топология обеспечивает, как правило, наилучшую сетевую организацию планиро-

вания процедур позиционирования [64], а распределенная топология характеризуется повышенной конфиденциальностью UE, вовлеченного в сеанс определения местоположения.

Для сценариев микросот сверхплотных сетей, с точки зрения вовлечения базовых станций и RIS в сеанс ОМП, различают три структуры систем сетевого позиционирования [2]: гетерогенную, с участием RIS и без организации сот (cell-free network).

Современные и перспективные сети связи по своей сути гетерогенны и образованы различными радиотехнологиями с радиоинтерфейсами нескольких стандартов и диапазонов. Преимуществом гетерогенных сетей является повышенное радиопокрытие и потенциальное снижение сквозной задержки.

В структуре системы сетевого позиционирования с участием RIS возможно увеличение радиопокрытия и прогнозирование коэффициентов ее канальной матрицы. В терагерцевом диапазоне требуемая для RIS площадь крайне мала, поэтому они могут без особых проблем развертываться в сценариях, где требуется повышенная точность позиционирования. Также RIS могут формировать условия NF, которые при надлежащей обработке повышают точность позиционирования [18].

В структуре системы сетевого позиционирования без организации сот радиопокрытие в заданном местоположении UE может обеспечиваться несколькими базовыми станциями одновременно. При оборудовании базовых станций и UE многоэлементными AP сверхбольшой размерности UM-

MIMO (аббр. от англ. Ultra-Massive MIMO) в структуре cell-free говорят о функционировании распределенных MIMO систем [65]. Одновременное участие нескольких базовых станций в сеансе ОМП позволяет собирать измерения с тех из них, которые обеспечивают наилучший геометрический фактор GDOP и более точные оценки углов прихода / ухода AOA / AOD сигналов.

Помимо перечисленных трех структур, находят применение и стратегии кооперативного позиционирования UE в режиме их непосредственного взаимодействия D2D (аббр. от англ. Device-to-Device). Несмотря на повышенное энергопотребление и накладные расходы при организации обмена данными между UE, кооперативное позиционирование способствует повышению точности оценки координат и радиопокрытия при ОМП [66]. Помимо базовых станций, RIS и других UE наземного развертывания, в сеансе ОМП могут участвовать и беспилотные летательные аппараты [61], а также бортовые инерциальные навигационные системы [45].

4.2.2. Аппаратное обеспечение

Для достижения компромисса между стоимостью оборудования и ключевыми показателями эффективности систем сетевого позиционирования оптимизация аппаратного обеспечения выполняется заблаговременно, или оффлайн. Она заключается в обоснованном выборе направленных свойств AP, разрядности квантования фазовращателей диаграммообразующей схемы и фаз элементов RIS, учете вклада эффектов несовершенства оборудования в результирующую точность. В частности, для учета влияния несовершенства аппаратного обеспечения на точность позиционирования вводится новая уточненная метрика НГКР – MCRB (аббр. от англ. Misspecified Cramer – Rao Bound) [67].

4.2.3. Сигналы первичных измерений

На сегодняшний день вопрос о выборе одностотных или многочастотных сигналов OFDM для использования в радиointерфейсе 6G терагерцового диапазона остается открытым [2]. Широкополосные одностотные сигналы с одной несущей характеризуются простотой реализации и могут использоваться в радиоканалах с гладкими по частоте замираниями, когда многолучевость проявляется незначительно. Однако вследствие частотной зависимости потерь молекулярного поглощения и присущих сценариям внутри помещений эффектов многолучевого РРВ предпочтительной для радиointерфейса 6G остается форма многочастотных сигналов OFDM с несколькими поднесущими; и это несмотря на достаточно высокую сложность их реализации и низкую энергоэффективность вследствие высокого пик-

фактора. Вместо отработанного радиointерфейса OFDM, в сетях 6G может также использоваться более новая схема передачи OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT, аббр. от англ. Discrete Fourier Transform), известная как DFT-OFDM. Она позволяет снизить пик-фактор по сравнению с обычной многочастотной схемой OFDM. В настоящем исследовании в целях сравнения эффективности систем сетевого позиционирования 5G диапазона MMB и 6G терагерцового диапазона далее для сбора первичных измерений в обоих случаях будем полагать использование радиointерфейса на основе многочастотной схемы OFDM.

Выбор других параметров радиointерфейса, таких как несущая частота, ширина полосы, длина кадра / пакета и др. также влияют и на пропускную способность системы радиосвязи, и на точность позиционирования системы сетевого ОМП. Например, увеличение ширины полосы частот позволяет повысить разрешение различных МЛК в домене времени, однако сопутствующий рост разрядности аналого-цифрового преобразователя на приеме и цифроаналогового преобразователя на передаче повысят сложность аппаратной реализации и снижат энергоэффективность. На выбор длины пакета также влияют противоречивые факторы. С одной стороны, чем больше длина пакета, тем большую энергию он в себе содержит и, соответственно, позволит более точно выполнить оценку первичных ДМ и УМ измерений. С другой стороны, чем выше скорость движения UE, т. е. короче интервал когерентности, тем короче должен быть и интервал сигнала (длина пакета, по которому выполняются первичные измерения). Также на длину пакета влияют ограничения по задержке.

4.3. Оффлайн-оптимизация систем сетевого позиционирования

Будем далее под оффлайн-оптимизацией понимать оптимизацию системы сетевого позиционирования 6G, которая проводится до начала функционирования этой системы и при отсутствии какой-либо предварительной информации об оценке координат и ориентации UE, однако в предположении об известном сценарии позиционирования, расположении окружающих объектов, например, отражателей SP, конфигурации и размерности AP базовой станции, RIS и UE. Целью оффлайн-оптимизации является выбор геометрической топологии субъектов позиционирования, включая базовую станцию, RIS и SP, синтез конфигурации и размерности AP, а также поиск кодовой книги лучей, т. е. матриц прекодирования на передаче и комбинирования на приеме.

4.3.1. Оптимизация топологии

Если число субъектов позиционирования базовых станций RIS и UE известно заблаговременно, их топология размещения может быть оптимизирована по критерию минимизации геометрического фактора снижения точности GDOP [68–70]. Дополнительно на этом этапе может быть выполнен прогноз зон LOS и NLOS, а также сориентированы надлежащим образом диаграммы направленности антенн на базовых станциях.

4.3.2. Оптимизация антенной решетки и кодовой книги лучей

С ростом числа элементов AP повышается угловое разрешение и увеличивается коэффициент усиления. Однако рост размерности AP приводит и к увеличению ее стоимости, а также повышенному энергопотреблению. При использовании AOSA объектом оптимизации становится каждый подмассив SA. Рост числа элементов в SA при достоинствах высокого углового разрешения и усиления имеет и недостатки, которые проявляются в снижении зоны радиопокрытия и возникновении зон так называемой «глухоты» вследствие работы узкими лучами [2].

Оптимизация кодовой книги лучей актуальна и востребована для режима начального установления направленного соединения, когда решение этой задачи можно трактовать как угловое позиционирование при отсутствии какой-либо предварительной информации о местоположении устройства. Работа узкими лучами на передачу и прием в терагерцовом диапазоне вследствие высоких потерь РРВ является вынужденной необходимостью и осложняет решение задачи первоначального выравнивания лучей. Эта задача осложняется еще больше в условиях движения UE, вследствие блокировок радиолиний LOS между базовой станцией и UE-препятствиями, а также при повороте корпуса устройства, так как ориентация луча, выполняемая в локальной СК, зависит от текущей ориентации UE в глобальной СК. Для режима начального установления направленного соединения могут быть предусмотрены заранее подготовленные кодовые книги ориентации лучей в заданных направлениях [71].

Различают следующие три подхода к поиску и оптимизации кодовой книги лучей [2]. При *исчерпывающем* поиске базовой станции или UE передают / принимают символы данных во всевозможных направлениях до тех пор, пока лучи не будут выровнены [72]. При *итеративном* поиске формируются иерархические кодовые книги для передачи сначала пилот-сигналов в широких секторах лучами с большим HPBW с последующей передачей пилот-сигналов в более узких секторах лучами с малым HPBW для уточнения ориентации

[73]. При поиске с *известным контекстом*, когда координаты устройства и / или отражателя известны, лучи могут быть сформированы на основе данных о местоположении UE и / или SP [74].

Из трех перечисленных подходов наилучшее выравнивание лучей с сохранением радиопокрытия обеспечивает исчерпывающий поиск. Недостатком этого подхода является увеличение задержки процедуры выравнивания с уменьшением ширины луча [52]. Итеративный поиск снижает и задержку, и зону радиопокрытия, так как сканирование выполняется с разными значениями HPBW, которым соответствуют разные коэффициенты усиления: широкой диаграмме направленности антенн соответствует слабое усиление, а узкой – высокое. Для систем сетевого позиционирования 6G терагерцового диапазона наиболее перспективным подходом к оптимизации кодовой книги лучей представляется поиск с известным контекстом, или ДО на основе позиционирования, когда выравнивание лучей выполняется по заранее известному местоположению [75, 76].

4.3.3. Пример оффлайн-оптимизации

Рассмотрим в качестве примера задачу оптимизации расположения RIS по критерию максимизации зоны радиопокрытия, в которой нижняя граница РЕВ не превышает заданный порог ϵ при известных местоположениях и ориентации AP базовых станций [2]. Для каждого возможного расположения RIS в зоне позиционирования, задаваемого координатами $\mathbf{p}_R$ и ориентацией $\mathbf{o}_R$, и каждого возможного местоположения UE, оборудованного ненаправленной антенной и задаваемого координатами $\mathbf{p}_U$, можно рассчитать FIM $J(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ и соответствующую ей метрику РЕВ $\mathcal{R}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ по формуле (19). В приведенных выражениях вектор $\boldsymbol{\eta}$ содержит вспомогательные (помимо координат UE) параметры состояния, такие как коэффициенты канала, сдвиги синхронизации и др. При вычислении FIM $J(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ при заданных исходных данных $\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R$ и $\mathbf{p}_U$ вектор вспомогательных параметров $\boldsymbol{\eta}$ инициализируется с их учетом как $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R, \mathbf{p}_U)$.

Задача оффлайн-оптимизации расположения RIS при описанных выше условиях и ограничениях быть формализована следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } |\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)| \text{ при } \mathbf{p}_R \in \mathbb{R}^3, \mathbf{o}_R \in \text{SO}(3), \\ & \mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R) = \{\mathbf{p}_U \in \mathbb{R}^3 | \text{РЕВ}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R) \leq \epsilon\}, \end{aligned} \quad (43)$$

где $\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ – зона радиопокрытия, в которой РЕВ не превышает заданный порог ϵ ; $|\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)|$ – измеримый по числу перебираемых местоположений UE объем зоны радиопокрытия, в которой осуществляется поиск расположения RIS.

Оптимизационная задача в такой постановке (43), как правило, не принадлежит к классу вы-

пуклых, и может потребовать поиска методом перебора [68–70].

Оптимизация систем сетевого позиционирования в сетях 6G терагерцового диапазона отличается от оптимизации систем предыдущих поколений по следующим признакам. Во-первых, матрицы прекодирования сигналов на передаче и комбинирования сигналов на приеме, а также коэффициенты RIS должны быть оптимизированы до того, как начинается оптимизация местоположений базовых станций и / или RIS для заданного сценария позиционирования. Во-вторых, оптимизация при наличии нескольких базовых станций и / или RIS гораздо сложнее, чем оптимизация системы с одной базовой станцией и одной RIS; поиск глобального экстремума чрезвычайно сложен с вычислительной точки зрения. Для поиска решения в таком случае предпочтительно использовать эвристические алгоритмы, которые вместо глобального экстремума дают наиболее подходящие субоптимальные результаты [2].

4.4. Онлайн-оптимизация систем сетевого позиционирования

Будем далее под онлайн-оптимизацией понимать оптимизацию системы сетевого позиционирования 6G, которая проводится в процессе функционирования этой системы в предположении частичной предварительной осведомленности о местоположении и ориентации UE. Например, в сценарии отслеживания текущее состояние UE оценивается на основе предыдущего состояния. Обобщенная задача онлайн-оптимизации системы позиционирования может быть сформулирована в терминах минимизации РЕВ и ОЕВ. Далее рассмотрим сценарии онлайн-оптимизации в контексте распределения радиоресурсов, процедур управления лучами и выбора коэффициентов RIS [2].

4.4.1. Оптимизация распределения радиоресурсов

Оптимальное распределение радиоресурсов является одной из задач управления многопользовательской системой радиосвязи и позиционирования. Рассмотрим вопросы управления радиоресурсов в традиционных для подвижной радиосвязи доменах времени, частоты и мощности. Управление радиоресурсом времени для однопользовательской системы радиосвязи, применительно к содержанию информационного кадра, должно преследовать цель максимизации полезной нагрузки и минимизации накладных расходов. В то же время, для повышения точности позиционирования передачи одних и тех же кадров, по которым выполняются первичные ДМ и УМ измерения, целесообразно повторять иногда по несколько раз; даже несмотря на повышение накладных расходов и задержки. Организация обмена кадрами, с

точки зрения выбора их длительности и частоты передач, должна соответствовать сценарию мобильности UE, в частности, длительность кадра следует выбирать в пределах интервала когерентности. Для многопользовательской системы радиосвязи и позиционирования описанные выше соображения должны учитываться в комплексе.

Управление радиоресурсом частоты в терагерцовом диапазоне имеет свою специфику, которая определяется зависимостью молекулярного поглощения, вызванного водяными парами и другими газами, от конкретного диапазона частот. Для учета этого обстоятельства терагерцовый диапазон подразделяется на поддиапазоны [77]. При этом ширина используемого поддиапазона уменьшается с увеличением требуемой дальности радиосвязи. Такой подход к выбору поддиапазона применим как для решения задач радиосвязи, так и позиционирования.

Управление радиоресурсом мощности определяется сценарием использования системы сетевого позиционирования. Обычно точность оценок координат (35) и ориентации (36) повышается с увеличением мощности передачи сигналов, по которым выполняются первичные измерения. В то же время система сетевого позиционирования обычно должна обеспечивать некоторую заданную точность. Поэтому, например, если внутри помещения требуется достижение точности в 1 см, то повышать мощность для достижения точности в 1 мм нецелесообразно [2].

Управление радиоресурсами при онлайн-оптимизации системы сетевого позиционирования обычно сводится к формализации заданных сценарием ограничений. Особый интерес представляет оптимизация процедур ДО: под оптимизацией активного ДО понимают формирование лучей на передаче и приеме базовой станции и UE, а под оптимизацией пассивного ДО – поиск коэффициентов RIS.

4.4.2. Оптимизация процедур управления лучами и коэффициентов RIS

При наличии сведений о местоположении UE базовая станция может сориентировать диапазон углов ухода / прихода своих лучей в направлении на UE так, чтобы максимизировать коэффициент усиления и, таким образом, увеличить дальность радиопокрытия. Такое ДО по местоположению позволяет повысить SNR в радиолинии и дает положительный эффект для радиосвязи [75, 76], однако повышение точности позиционирования по метрике НГКР при этом не гарантировано. С точки зрения позиционирования целесообразнее оптимизировать матрицы прекодирования и комбинирования для отслеживания углов ухода AOD и прихода AOA в заданной области неопределенно-

сти местоположения UE [78]. При многократных первичных УМ измерениях может выполняться синхронная локализация и оптимизация матриц диаграммообразующей схемы [79]. Примеры сценариев управления формой и шириной луча, которые иллюстрируют суть подхода, описаны в [82].

При использовании AOSA возможно одновременное формирование нескольких лучей в пространстве, формируемых SA. Объектом оптимизации могут быть также и матрицы коэффициентов гибридного ДО. В многопользовательском сценарии актуальна задача распределения лучей SA на различные UE при выполнении задач радиосвязи и позиционирования с требуемыми показателями [2].

В системах сетевого позиционирования с участием RIS оптимизация коэффициентов RIS так же важна, как и оптимизация процедур управления лучами на базовой станции и UE. Надлежащий выбор коэффициентов RIS позволяет управлять отражением МЛК и повышает коэффициент усиления полезного сигнала. Коэффициенты RIS можно оптимизировать как для решения задач радиосвязи, так и для позиционирования [80]. Для радиосвязи критерием оптимизации может выступать максимизация SNR, который, однако, не гарантирует повышения точности ОМП. Для позиционирования критерием оптимизации может выступать минимизация РЕВ.

4.4.3. Пример онлайн-оптимизации

Рассмотрим в качестве примера задачу оптимизации коэффициентов интеллектуальной поверхности ω_g , содержащихся в матрицах профилей фаз RIS $\Omega_1, \dots, \Omega_G$ для $g = 1, \dots, G$ передач при ограничении на заданную матрицу прекодирования передающего UE и матрицу комбинирования принимающей базовой станции [2]. Критерием оптимизации будем считать минимизацию порога ε РЕВ. Будем полагать, что местоположение UE известно с точностью до принадлежности к некоторой зоне неопределенности в пространстве: $\mathbf{p}_U \in \mathcal{R} \subset \mathbb{R}^3$. Пусть вектор $\boldsymbol{\eta}$ содержит вспомогательные (помимо координат UE) параметры состояния, а искомые коэффициенты RIS образованы диагональными элементами матрицы комплексных профилей фаз $\omega_g = \text{diag}(\Omega_g) \in \mathbb{C}^{N_R \times N_R}$. Тогда можно вычислить FIM $\mathbf{J}(\hat{\mathbf{p}}_U, \boldsymbol{\eta} | \omega_1, \dots, \omega_G)$ оценок координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ в зависимости от набора коэффициентов RIS $\omega_1, \dots, \omega_G$ для G передач. Задача онлайн-оптимизации коэффициентов RIS при описанных выше условиях и ограничениях может быть формализована следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \varepsilon \text{ при РЕВ}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \omega_1, \dots, \omega_G) \leq \varepsilon, \\ & \mathbf{p}_U \in \mathcal{R}^*, \quad |\omega_{r,g}| = 1, \forall r, g, \end{aligned} \quad (44)$$

где $|\omega_{r,g}| = 1, \forall r, g$ означает, что выполняется поиск только фаз комплексных коэффициентов с единичной амплитудой.

В системах сетевого позиционирования 6G вопросы оффлайн- и онлайн-оптимизации с участием RIS являются принципиально важными [11–17], поскольку RIS способны частично компенсировать высокое затухание при PPV и вероятные блокировки в радиолиниях терагерцового диапазона.

5. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе выполняется имитационное моделирование заданного геометрического сценария позиционирования в сетях 5G диапазона ММВ и сетях 6G терагерцового диапазона согласно программному модулю [81]. Сравниваются показатели точности позиционирования по метрикам РЕВ и ОЕВ на несущей $f_c = 60$ ГГц диапазона ММВ 5G и несущей $f_c = 0,3$ ТГц терагерцового диапазона 6G для сценария сбора первичных измерений в радиолинии «вверх» UE $\rightarrow$ BS.

Таблица 2 содержит используемые в имитационной модели позиционирования параметры исследуемого сценария с некоторыми отличиями от [2], в частности, с увеличенным территориальным разнесом базовых станций и UE для реализации сценария дальней зоны (скрипт 1 в [1]). В исследуемом сценарии сравниваются РЕВ и ОЕВ. Для сравнения фиксируются параметры мощности P и интервала передачи T , а также геометрические размеры приемной AP на базовой станции.

Для системы сетевого позиционирования диапазона ММВ будем полагать использование модели приема в полносвязной цифровой MIMO системе с единым массивом AP, когда каждому элементу AP соответствует свой модуль RFC, а для терагерцового диапазона будем полагать использование модели приема в гибридной MIMO системе из AOSA, когда каждому SA соответствует свой модуль RFC [1]. В рассматриваемом сценарии UE и базовые станции работают в условиях LOS, согласно модели плоского фронта волны PWM, в дальней зоне. При этом UE и базовая станция идеально синхронизированы и в радиолинии UE $\rightarrow$ BS $B = 0$. Ненулевой сдвиг синхронизации сделал бы оценку времен прихода сигналов TOA в единственной радиолинии с прямой видимостью LOS затруднительной. В то же время сбор ДМ измерений при наличии сдвига синхронизации в радиолинии UE $\rightarrow$ BS возможен в условиях NLOS с обработкой нескольких МЛК, в том числе, при участии RIS в сеансе позиционирования. Также в рассматриваемом сценарии предполагается отсутствие информации о состоянии UE, поэтому ДО единым массивом и составными подмассивами AP на этапе

начального установления соединения начинается с передач в лучах со случайно выбранной ориентацией в диапазоне $\tilde{\varphi}, \tilde{\theta} \in (-90^\circ, 90^\circ)$ азимутов $\tilde{\varphi}$ и углов места $\tilde{\theta}$ в пространстве.

ТАБЛИЦА 2. Параметры сценария имитационной модели позиционирования в сетях 5G / 6G

TABLE 2. Parameters of the Simulation Model Scenario for Positioning in 5G / 6G Networks

Параметр	Значение
Центральная несущая частота, f_c	60 ГГц / 0,3 ТГц
Мощности передачи, P	20 дБм
Спектральная плотность мощности шума, N_0	-174 дБм/Гц
Коэффициент шума приемника	10 дБм
Геометрический размер AP на базовой станции	2×2 см ²
Расстояние между элементами AP, Δ	$\lambda_c/2$
Ширина полосы частот, W	100 МГц
Число передач, G	5
Модель фронта волны	PWM в дальней зоне
Сценарий оценки координат и ориентации	оценка координат 2D, ориентация 1D
Размерность AP в диапазоне ММВ / ТГц на базовой станции, N_B	1×1, 2×2, 3×3, ..., 10×10
Размерность AOSA в терагерцевом диапазоне на базовой станции, $N'_B N_B$	5×5, 10×10, 15×15, ..., 50×50
Размерность SA в ТГц на базовой станции, N'_B	5×5
Истинные координаты базовой станции / UE, p_B / p_U	[0,0,0] ^T / [10,5,0] ^T м
Истинная ориентация базовой станции / UE, o_B / o_U	[0,0,0] ^T / [π,0,0] ^T

Рисунок 2 иллюстрирует вариант размерности и конфигурации AP в диапазоне ММВ и ТГц на подложке размером 2×2 см² при $N_B = 4 \times 4$ и $N'_B = 5 \times 5$ [2]. Рисунок 3 – зависимости НГКР дисперсии оценок координат РЕВ и ОЕВ устройств в пространстве от размерности и конфигурации AP на базовой станции. Цвета не соответствуют конфигурациям на рисунке 2: черный, зеленый и синий показывают сценарии, в которых участвует единый массив AP, определяемый размерностью N_B от 1×1, до 10×10; красный цвет показывает сценарии, в которых участвует массив AOSA из подмассивов SA размерностью $N'_B = 5 \times 5$; итоговая размерность определяется произведением $N'_B N_B$ и в примере на рисунке 2d равна 20×20.

Результаты оценки РЕВ (см. рисунок 3а) и ОЕВ (см. рисунок 3б) показаны для сценариев, учитывающих диапазон с несущей частотой f_c , ширину полосы W , конфигурацию AP и расстояние Δ между ее элементами: 1) $f_c = 60$ ГГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 2) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B

элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 3) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B элементов с $\Delta = 2,5\lambda_c$; 4) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 5) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 6) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$ и знанием канала CSI.

Анализ графиков на рисунке 3 позволяет сделать следующие выводы:

1) с увеличением размерности AP, независимо от ее конфигурации (единый или составной массив) показатели РЕВ и ОЕВ уменьшаются для всех сценариев имитационной модели;

2) при прочих равных условиях, РЕВ и ОЕВ в диапазоне ММВ для единого массива AP ниже, чем в терагерцевом диапазоне, что можно объяснить меньшими потерями при РРВ; в то же время, в терагерцевом диапазоне увеличение разности антенных элементов с $\Delta = \lambda_c/2$ до $\Delta = 2,5\lambda_c$ приводит к небольшому снижению РЕВ и значительному снижению ОЕВ;

3) использование AOSA приводит к снижению РЕВ и ОЕВ в терагерцевом диапазоне по сравнению с диапазоном ММВ несмотря на более высокие потери РРВ;

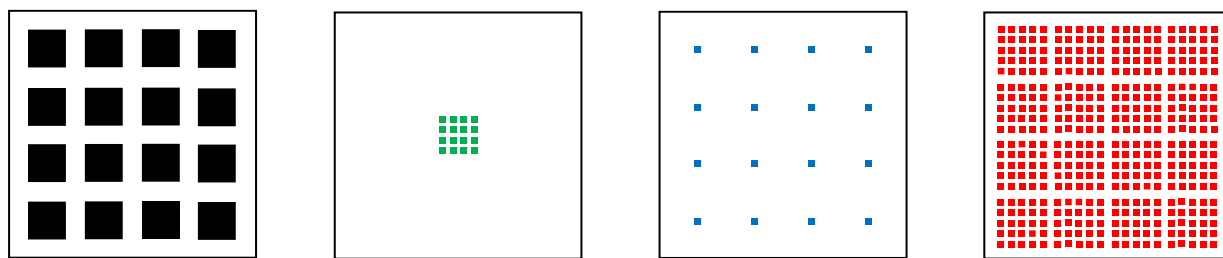
4) при увеличении ширины полосы частот с $W = 0,1$ ГГц до $W = 1$ ГГц показатель РЕВ заметно уменьшается, а показатель ОЕВ не изменяется; данные зависимости объясняются повышением разрешения при корреляционной обработке ДМ измерений, которые влияют только на точность оценки координат;

5) использование предварительного знания о состоянии канала CSI повышает точность оценки координат по критерию РЕВ;

6) в диапазоне ММВ дециметровая точность оценки координат с единым массивом достигается при более, чем $N_B = 64$ элементах AP и ширине полосы частот $W = 0,1$ ГГц; в терагерцевом диапазоне дециметровая точность оценки координат достигается составным массивом размерности более, чем $N'_B N_B = 525$ элементов AOSA с расстоянием между элементами $\Delta = \lambda_c/2$ и ширине полосы частот $W = 0,1$ ГГц;

7) сантиметровая точность оценки координат в терагерцевом диапазоне достигается составным массивом размерности более, чем $N'_B N_B = 2500$ элементов AOSA с расстоянием между элементами $\Delta = \lambda_c/2$, ширине полосы частот $W = 1$ ГГц и предварительном знании состояния канала CSI;

8) точность ориентации в 1° в терагерцевом диапазоне достигается составным массивом AOSA размерности из более, чем $N'_B N_B = 525$ элементов с расстоянием между ними $\Delta = \lambda_c/2$, шириной полосы частот $W = 1$ ГГц и предварительным знанием состояния канала CSI.



а) АОСА, $f_c = 60$ ГГц, $\Delta = \lambda_c/2$; б) ТГц, $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$; в) ТГц, $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = 2,5\lambda_c$; г) АОСА, $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$

Рис. 2. Варианты размерности и конфигурации АА в диапазоне ММВ и ТГц: а) $f_c = 60$ ГГц, $\Delta = \lambda_c/2$; б) $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$; в) $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = 2,5\lambda_c$; г) АОСА, $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$

Fig. 2. Variants of the Dimensions and Configurations of the AA in the MMW and THz Range: a) $f_c = 60$ GHz, $\Delta = \lambda_c/2$; b) $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = \lambda_c/2$; c) $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = 2,5\lambda_c$; d) АОСА, $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = \lambda_c/2$

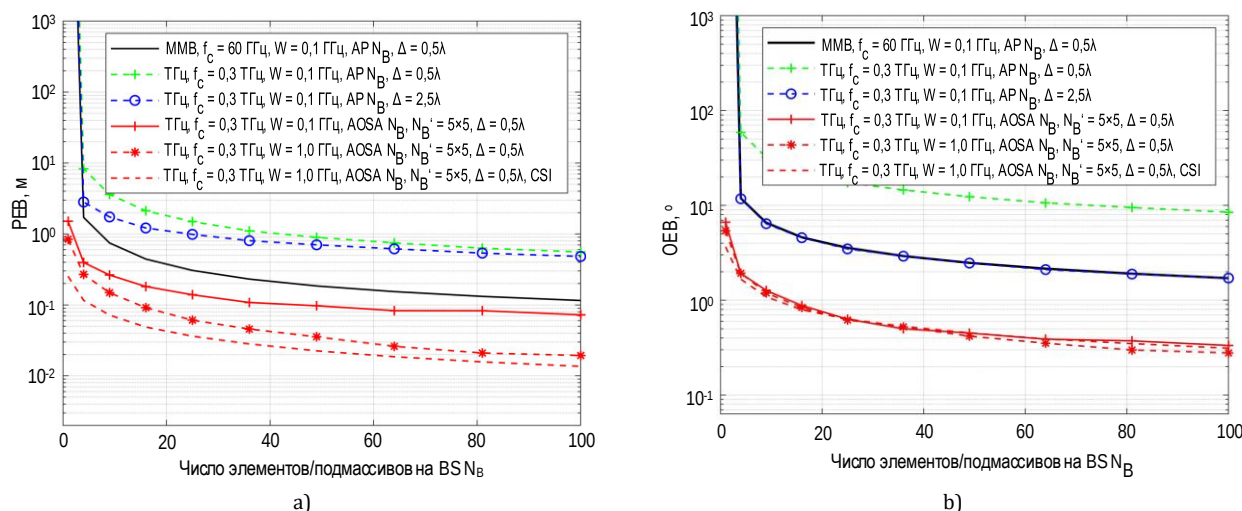


Рис. 3. Зависимости РЕВ (а) и ОЕВ (б) от размерности и конфигурации АР

Fig. 3. Dependences of PEB (a) and OEB (b) on the Dimension and Configuration of the AA

Отметим, что полученные оценки отличаются от результатов [2] в сторону снижения точности по причине увеличения расстояния между базовой станцией и UE. Основным выводом проведенного имитационного моделирования является научное обоснование достижения дециметровой точности оценок координат по метрике РЕВ и углового разрешения ориентации устройств в 1° в терагерцовом диапазоне при использовании полосы частот $W = 1$ ГГц и АОСА из более, чем полутысячи элементов.

Дальнейшие пути повышения углового и пространственного разрешения устройств по критериям РЕВ и ОЕВ в сверхплотных сетях 6G терагерцового диапазона связаны с использованием эффектов NF и переотражений, в том числе, от RIS.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в настоящем исследовании анализ моделей оценки точности, обзор алгоритмов и путей их оптимизации, а также численный эксперимент служат цели обоснования используемой конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции для достижения дециметровой точности. В рамках обозначенной в первой части цикла научной проблемы поиска новых методов и средств достижения дециметровой и сантиметровой точности оценок координат в третьей части цикла исследования планируется моделирование сценариев использования однократно отраженных многолучевых компонент, реконфигурируемой интеллектуальной поверхности, а также эффекта сферического фронта волны в ближней зоне для достижения сантиметровой точности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AOA	Angle of Arrival	Угол прихода сигнала
AOD	Angle of Departure	Угол ухода сигнала
AOSA	Array of Sub Array	Антенная решетка из составных подмассивов
BS	Base Station	Базовая станция

CNN	Convolutional Neural Networks	Сверточные нейронные сети
CRF	Conventional Radio Frequency	Традиционный (для систем подвижной радиосвязи) диапазон ДМВ и СМВ
CSI	Channel State Information	Информация о состоянии канала
D2D	Device-to-Device	Режим непосредственного взаимодействия устройств
DFT	Discrete Fourier Transform	Дискретное преобразование Фурье
DNN	Deep Neural Networks	Глубокие нейронные сети
EFIM	Equivalent Fisher Information Matrix	Эквивалентная информационная матрица Фишера
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques	Метод определения углов прихода множества источников сигналов в антенных решетках; использует спектральное разложение корреляционной матрицы сигналов
GDOP	Geometric Dilution of Precision	Геометрический фактор снижения точности
gNB	gNodeB	Базовая станция 5G NR
HPBW	Half Power Beam Width	Ширина луча по уровню половинной мощности
LOS	Line Of Sight	Наличие прямой видимости
MCRB	Misspecified Cramer-Rao Bound	Уточненная нижняя граница Крамера – Рао
ML	Machine Learning	Машинное обучение
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Многоантенная система с множеством входов и множеством выходов
MSE	Mean Squared Error	Среднеквадратическая ошибка
MUSIC	MUltiple Signal Classification	Метод определения углов прихода множества источников сигналов в антенных решетках
NF	Near Field	Ближняя зона
NLOS	Non-Line of Sight	Отсутствие прямой видимости
OEB	Orientation Error Bound	Нижняя граница погрешности оценки ориентации
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением
PEB	Position Error Bound	Нижняя граница погрешности оценки координат
PWM	Plane Wave Model	Модель плоского фронта волны
RFC	Radio Frequency Chain	Радиочастотный модуль
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность
RMSE	Root Mean Squared Error	Корень из среднеквадратической ошибки
RSS	Received Signal Strength	Уровень мощности принимаемого сигнала
SA	Sub Array	Составной подмассив
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Одновременная локализация и построение карты
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Отношение сигнал / (шум + помеха)
SP	Specular Point	Рассеиватель
SWM	Spherical Wave Model	Модель сферического фронта волны
TOA	Time of Arrival	Время прихода сигнала
UE	User Equipment	Пользовательское устройство
UM-MIMO	Ultra-Massive MIMO	Многоантенные MIMO системы сверхбольшой размерности
АБГШ	Аддитивный белый гауссовский шум	
АР	Антенная решетка	
ДМ	Дальномерный метод	
ДМВ	Дециметровые волны	
ДММВ	Децимиллиметровые волны	
ДО	Диаграммообразование	
МЛК	Многочувствительная компонента	
ММВ	Миллиметровые волны	
НГКР	Нижняя граница Крамера – Рао	
ОМП	Определение местоположения	
РДМ	Разностно-дальномерный метод	
РРВ	Распространение радиоволн	
СМВ	Сантиметровые волны	
ТГц	Терагерцовый диапазон	
УМ	Угломерный метод	

Список источников

1. Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 1. Обзор методов и постановка задачи. Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 73–98. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-73-98. EDN:FTOVZJ
2. Chen H., Sardeddeen H., Ballal T., Wymeersch H., Alouini M.-S., Al-Naffouri T.Y. A Tutorial on Terahertz-Band Localization for 6G Communication Systems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24. Iss. 3. PP. 1780–1815. DOI:10.1109/COMST.2022.3178209
3. Garcia N., Wymeersch H., Larsson E.G., Haimovich A.M., Coulon M. Direct Localization for Massive MIMO // IEEE Transactions on Signal Processing. 2017. Vol. 65. Iss. 10. PP. 2475–2487. DOI:10.1109/TSP.2017.2666779
4. Shen Y., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization–Part I: A General Framework // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. Iss. 10. PP. 4956–4980. DOI:10.1109/TIT.2010.2060110
5. Shen Y., Wymeersch H., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization. Part II: Cooperative Networks // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. Iss. 10. PP. 4981–5000. DOI:10.1109/TIT.2010.2059720
6. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. 5G Position and Orientation Estimation through Millimeter Wave MIMO // Proceedings of the Globecom Workshops (GC Wkshps, San Diego, USA, 06–10 December 2015). IEEE, 2015. PP. 1–6. DOI:10.1109/GLOCOMW.2015.7413967
7. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. Position and Orientation Estimation through Millimeter-Wave MIMO in 5G Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. Iss. 3. PP. 1822–1835. DOI:10.1109/TWC.2017.2785788
8. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G., Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. Iss. 8. PP. 4939–4954. DOI:10.1109/TWC.2018.2832134
9. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Zhou X., Seco-Granados G., Abhayapala T. Random-Phase Beamforming for Initial Access in Millimeter-Wave Cellular Networks // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, Washington, USA, 04–08 December 2016). IEEE, 2016. PP. 1–6. DOI:10.1109/GLOCOM.2016.7842197
10. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Abhayapala T., Seco-Granados G. Single-Anchored Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. Iss. 6. PP. 6388–6400. DOI:10.1109/TVT.2020.2987039
11. Wymeersch H., Denis B. Beyond 5G Wireless Localization with Reconfigurable Intelligent Surfaces // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Dublin, Ireland, 07–11 June 2020). IEEE, 2020. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC40277.2020.9148744
12. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Alouini M.-S. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Localization: Position and Orientation Error Bounds // IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. Vol. 69. PP. 5386–5402. DOI:10.1109/TSP.2021.3101644
13. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Dardari D., Alouini M.-S. Toward 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives // IEEE Internet of Things Magazine. 2023. Vol. 6. Iss. 3. PP. 138–143. DOI:10.1109/IOTM.001.2200218
14. Keykhosravi K., Keskin M.F., Seco-Granados G., Wymeersch H. SISO RIS-Enabled Joint 3D Downlink Localization and Synchronization // Proceedings of the International Conference on Communications (Montreal, Canada, 14–23 June 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500281
15. Huang C., Hu S., Alexandropoulos G.C., Zappone A., Zappone A., Yuen C., et al. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends // IEEE Wireless Communications. 2020. Vol. 27. Iss. 5. PP. 118–125. DOI:10.1109/MWC.001.1900534
16. Basar E., Yildirim I., Kilinc F. Indoor and Outdoor Physical Channel Modeling and Efficient Positioning for Reconfigurable Intelligent Surfaces in mmWave Bands // IEEE Transactions on Communications. 2021. Vol. 69. Iss. 12. PP. 8600–8611. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3113954
17. He J., Jiang F., Keykhosravi K., Kokkonen J., Wymeersch H., Juntti M. Beyond 5G RIS mmWave Systems: Where Communication and Localization Meet // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 68075–68084. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3186510
18. Wymeersch H. A Fisher Information Analysis of Joint Localization and Synchronization in near Field // Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops, Dublin, Ireland, 07–11 June 2020). IEEE, 2020. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145059
19. Nazari M.A., Seco-Granados G., Johannisson P., Wymeersch H. 3D Orientation Estimation with Multiple 5G mmWave Base Stations // Proceedings of the Conference on Communications (Montreal, Canada, 14–23 June 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500778
20. Chepuri S.P., Leus G., van der Veen A.-J. Rigid Body Localization Using Sensor Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 2014. Vol. 62. Iss. 18. PP. 4911–4924. DOI:10.1109/TSP.2014.2336621
21. Wen F., Wymeersch H., Peng B., Tay W.P., So H.C., Yang D. A survey on 5G massive MIMO localization // Digital Signal Processing. 2019. Vol. 94. PP. 21–28. DOI:10.1016/j.dsp.2019.05.005
22. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемопередатчиков в системах когнитивного радио 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 6. С. 4–20. DOI:10.36724/2072-8735-2024-18-6-4-20. EDN:KVNDXU
23. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34. Iss. 3. PP. 276–280. DOI:10.1109/TAP.1986.1143830
24. Fortunati S., Grasso R., Gini F., Greco M.S., LePage K. Single snapshot DOA estimation by using compressed sensing // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2014. Vol. 1. Iss. 120. PP. 1–17. DOI:10.1186/1687-6180-2014-120

25. Wan L., Sun Y., Sun L., Ning Z., Rodrigues J.J.P.C. Deep Learning Based Autonomous Vehicle Super Resolution DOA Estimation for Safety Driving // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22. Iss. 7. PP. 4301–4315. DOI:10.1109/TITS.2020.3009223
26. Dardari D., Chong C.-C., Win M. Threshold-Based Time-of-Arrival Estimators in UWB Dense Multipath Channels // IEEE Transactions on Communications. 2008. Vol. 56. Iss. 8. PP. 1366–1378. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050551
27. Giorgetti A., Chiani M. Time-of-Arrival Estimation Based on Information Theoretic Criteria // IEEE Transactions on Signal Processing. 2013. Vol. 61. Iss. 8. PP. 1869–1879. DOI:10.1109/TSP.2013.2239643
28. Jiang F., Ge Y., Zhu M., Wymeersch H. High-dimensional Channel Estimation for Simultaneous Localization and Communications // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Nanjing, China, 29 March – 01 April 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417496
29. Fei Z., Li B., Yang S., Xing C., Chen H., Hanzo L. A Survey of Multi-Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms, and Open Problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. PP. 550–586. DOI:10.1109/COMST.2016.2610578
30. Koike-Akino T., Wang P., Pajovic M., Sun H., Orlik P.V. Fingerprinting-Based Indoor Localization with Commercial MMWave WiFi: A Deep Learning Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 84879–84892. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2991129
31. Vieira J., Leitinger E., Sarajlic M., Li X., Tufvesson F. Deep convolutional neural networks for massive MIMO fingerprint-based positioning // Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC, Montreal, Canada, 08–13 October 2017). IEEE, 2017. PP. 1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2017.8292280
32. Mateos-Ramos J.M., Song J., Wu Y., Häger C., Keskin M.F., Yajnanarayana V., et al. End-to-End Learning for Integrated Sensing and Communication // Proceedings of the International Conference on Communications (Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 1942–1947. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9838308
33. Wu Y., Gustavsson U., Amat A.G.I., Wymeersch H. Low Complexity Joint Impairment Mitigation of I/Q Modulator and PA Using Neural Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2022. Vol. 40. Iss. 1. PP. 54–64. DOI:10.1109/JSAC.2021.3126024
34. Alzahed A.M., Mikki S.M., Antar Y.M.M. Nonlinear Mutual Coupling Compensation Operator Design Using a Novel Electromagnetic Machine Learning Paradigm // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 5. PP. 861–865. DOI:10.1109/LAWP.2019.2903787
35. Wu Y., Song J., Häger C., Gustavsson U., i Amat A.G., Wymeersch H. Symbol-Based Over-the-Air Digital Predistortion Using Reinforcement Learning // Proceedings of the International Conference on Communications (Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 2615–2620. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9839091
36. Kase Y., Nishimura T., Ohgane T., Ogawa Y., Kitayama D., Kishiyama Y. DOA Estimation of Two Targets with Deep Learning // Proceedings of the 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC, Bremen, Germany, 25–26 October 2018). 2018. PP. 1–5. DOI:10.1109/WPNC.2018.8555814
37. Barthelme A., Utschick W. A Machine Learning Approach to DoA Estimation and Model Order Selection for Antenna Arrays With Subarray Sampling // IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. Vol. 69. PP. 3075–3087. DOI:10.1109/TSP.2021.3081047
38. Dvorecki N., Bar-Shalom O., Banin L., Amizur Y. A machine learning approach for Wi-Fi RTT ranging // Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation (Hyatt Regency Reston Reston, Virginia, USA, 28 – 31 January 2019). 2019. PP. 435–444. DOI:10.33012/2019.16702
39. Wymeersch H., Marano S., Gifford W.M., Win M.Z. A Machine Learning Approach to Ranging Error Mitigation for UWB Localization // IEEE Transactions on Communications. 2012. Vol. 60. Iss. 6. PP. 1719–1728. DOI:10.1109/TCOMM.2012.042712.110035
40. Jiang C., Shen J., Chen S., Chen Y., Liu D., Bo Y. UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 24. Iss. 10. PP. 2226–2230. DOI:10.1109/LCOMM.2020.2999904
41. Guo X., Li L., Ansari N., Liao B. Knowledge Aided Adaptive Localization via Global Fusion Profile // IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5. Iss. 2. PP. 1081–1089. DOI:10.1109/JIOT.2017.2787594
42. Burghal D., Ravi A.T., Rao V., Alghafis A.A., Molisch A.F. A comprehensive survey of machine learning based localization with wireless signals // arXiv:2012.11171. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2012.11171
43. Studer C., Medjkouh S., Gonultas E., Goldstein T., Tirkkonen O. Channel Charting: Locating Users Within the Radio Environment Using Channel State Information // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 47682–47698. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2866979
44. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 45–59. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59. EDN:PYHUMZ
45. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств с комплексированием дальномерных, угломерных и инерциальных измерений в расширенном фильтре Калмана // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 51–67. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-51-67. EDN:AIEESO
46. Киреев А.В., Фокин Г.А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 54–62. EDN:YMIHOI
47. Gustafsson F. Particle filter theory and practice with positioning applications // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2010. Vol. 25. Iss. 7. PP. 53–82. DOI:10.1109/MAES.2010.5546308
48. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and Mapping: Part I // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13. Iss. 2. PP. 99–110. DOI:10.1109/MRA.2006.1638022

49. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13. Iss. 3. PP. 108–117. DOI:10.1109/MRA.2006.1678144
50. Yassin A., Nasser Y., Al-Dubai A.Y., Awad M. MOSAIC: Simultaneous Localization and Environment Mapping Using mmWave Without A-Priori Knowledge // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 68932–68947. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2879436
51. Barneto C.B., Riihonen T., Turunen M., Koivisto M., Talvitie J., Valkama M. Radio-based Sensing and Indoor Mapping with Millimeter-Wave 5G NR Signals // Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS, Tampere, Finland, 02–04 June 2020). 2020. PP. 1–5. DOI:10.1109/ICL-GNSS49876.2020.9115568
52. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003. EDN:GWPZQH
53. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94–103. EDN:YQWNJ
54. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63. EDN:OEXILA
55. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99. EDN:BRJHYG
56. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Исследование зависимости значения геометрического фактора снижения точности от топологии пунктов приема // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 99–104. EDN:XRZIXB
57. Лазарев В.О., Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 88–100. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-88-100. EDN:FFMJWI
58. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 2. 2D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 65–78. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-65-78. EDN:RJHISC
59. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 3. 3D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 87–102. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-87-102. EDN:FKSYIZ
60. Фокин Г.А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 4–17. EDN:DQRXIK
61. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 2021. 499 с. EDN:PQMSQX
62. Фокин Г.А. Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78–82. EDN:RVFDCV
63. Фокин Г.А. Имитационное моделирование процесса распространения радиоволн в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 83–89. EDN:RVFDDF
64. Фокин Г.А. Процедуры позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2021. № 11. С. 2–8. EDN:DEFMNY
65. Faisal A., Sameddeen H., Dahrouj H., Al-Naffouri T.Y., Alouini M.-S. Ultramassive MIMO Systems at Terahertz Bands: Prospects and Challenges // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2020. Vol. 15. Iss. 4. PP. 33–42. DOI:10.1109/MVT.2020.3022998
66. Stratidakis G., Boulogeorgos A.-A.A., Alexiou A. A cooperative localization-aided tracking algorithm for THz wireless systems // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Marrakesh, Morocco, 15–18 April 2019). PP. 1–7. IEEE, 2019. DOI:10.1109/WCNC.2019.8885710
67. Chen H., Aghdam S.R., Keskin M.F., Wu Y., Lindberg S., Wolfgang A., et al. MCRB-based Performance Analysis of 6G Localization under Hardware Impairments // Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops, Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 115–120. DOI:10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814598
68. Фокин Г.А. Модель поиска топологии локальной дальномерной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4(44). С. 27–38. DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38. EDN:XHPHAA
69. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 1. Модели и методы геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 32–59. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-32-59. EDN:PUMZTF
70. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 2. Поиск по критерию геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 4. С. 27–37. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37. EDN:YVEMNW
71. Li Y.-N.R., Gao B., Zhang X., Huang K. Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 13282–13293. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963514
72. Alkhateeb A., Nam Y.-H., Rahman M.S., Zhang J., Heath R.W. Initial Beam Association in Millimeter Wave Cellular Systems: Analysis and Design Insights // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 5. PP. 2807–2821. DOI:10.1109/TWC.2017.2666806

73. Qi C., Chen K., Dobre O.A., Li G.Y. Hierarchical Codebook-Based Multiuser Beam Training for Millimeter Wave Massive MIMO // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19. Iss. 12. PP. 8142–8152. DOI:10.1109/TWC.2020.3019523
74. Hu A., He J. Position-Aided Beam Learning for Initial Access in mmWave MIMO Cellular Networks // *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16. Iss. 1. PP. 1103–1113. DOI:10.1109/JSYST.2020.3027757
75. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9. № 4. С. 44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU
76. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 2. Модель совокупности радиолиний. Труды учебных заведений связи. Т. 9. № 5. С. 43–64. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64. EDN:QPZIOK
77. Han C., Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. Iss. 6. PP. 96–101. DOI:10.1109/MCOM.2018.1700898
78. Garcia N., Wymeersch H., Slock D.T.M. Optimal Precoders for Tracking the AoD and AoA of a mmWave Path // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. Vol. 66. Iss. 21. PP. 5718–5729. DOI:10.1109/TSP.2018.2870368
79. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019. Vol. 67. Iss. 6. PP. 1620–1635. DOI:10.1109/TSP.2019.2894789
80. Björnson E., Wymeersch H., Matthiesen B., Popovski P., Sanguinetti L., de Carvalho E. Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2022. Vol. 39. Iss. 2. PP. 135–158. DOI:10.1109/MSP.2021.3130549
81. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е., Горбачева Л.С. Программный модуль исследования зависимости точности позиционирования и ориентации устройств в пространстве от размерности антенной решетки на базовой станции в сверхплотных сетях миллиметрового и терагерцового диапазона. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023682152 от 12.10.2023. Оpubл. 23.10.2023. EDN:NIDIYO
82. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б. Модели пространственной селекции при диаграммообразовании на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2024. Т. 16. № 1. С. 195–216. DOI:10.20537/2076-7633-2024-16-1-195-216. EDN:ENQMBZ

References

1. Fokin G. A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 1. Methods Survey and Problem Statement. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):73–98. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-73-98. EDN:FTOVZJ
2. Chen H., Srieddeen H., Ballal T., Wymeersch H., Alouini M.-S., Al-Naffouri T.Y. A Tutorial on Terahertz-Band Localization for 6G Communication Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022;24(3):1780–1815. DOI:10.1109/COMST.2022.3178209
3. Garcia N., Wymeersch H., Larsson E.G., Haimovich A.M., Coulon M. Direct Localization for Massive MIMO. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2017;65(10):2475–2487. DOI:10.1109/TSP.2017.2666779
4. Shen Y., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization–Part I: A General Framework. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(10):4956–4980. DOI:10.1109/TIT.2010.2060110
5. Shen Y., Wymeersch H., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization. Part II. Cooperative Networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(10):4981–5000. DOI:10.1109/TIT.2010.2059720
6. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. 5G Position and Orientation Estimation through Millimeter Wave MIMO. *Proceedings of the Globecom Workshops, GC Wkshps, 06–10 December 2015, San Diego, USA*. IEEE, 2015. p.1–6. DOI:10.1109/GLOCOMW.2015.7413967
7. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. Position and Orientation Estimation Through Millimeter-Wave MIMO in 5G Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(3):1822–1835. DOI:10.1109/TWC.2017.2785788
8. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G., Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(8):4939–4954. DOI:10.1109/TWC.2018.2832134
9. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Zhou X., Seco-Granados G., Abhayapala T. Random-Phase Beamforming for Initial Access in Millimeter-Wave Cellular Networks. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 04–08 December 2016, Washington, USA*. IEEE; 2016. p.1–6. DOI:10.1109/GLOCOM.2016.7842197
10. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Abhayapala T., Seco-Granados G. Single-Anchor Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020;69(6):6388–6400. DOI:10.1109/TVT.2020.2987039
11. Wymeersch H., Denis B. Beyond 5G Wireless Localization with Reconfigurable Intelligent Surfaces. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 07–11 June 2020, Dublin, Ireland*. IEEE; 2020. p.1–6. DOI:10.1109/ICC40277.2020.9148744
12. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Alouini M.-S. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Localization: Position and Orientation Error Bounds. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2021;69:5386–5402. DOI:10.1109/TSP.2021.3101644
13. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Dardari D., Alouini M.-S. Toward 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2023;6(3):138–143. DOI:10.1109/IOTM.001.2200218

14. Keykhosravi K., Keskin M.F., Seco-Granados G., Wymeersch H. SISO RIS-Enabled Joint 3D Downlink Localization and Synchronization. *Proceedings of the International Conference on Communications, 14–23 June 2021, Montreal, Canada*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500281
15. Huang C., Hu S., Alexandropoulos G.C., Zappone A., Zappone A., Yuen C., et al. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends. *IEEE Wireless Communications*. 2020;27(5):118–125. DOI:10.1109/MWC.001.1900534
16. Basar E., Yildirim I., Kilinc F. Indoor and Outdoor Physical Channel Modeling and Efficient Positioning for Reconfigurable Intelligent Surfaces in mmWave Bands. *IEEE Transactions on Communications*. 2021;69(12):8600–8611. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3113954
17. He J., Jiang F., Keykhosravi K., Kokkonen J., Wymeersch H., Juntti M. Beyond 5G RIS mmWave Systems: Where Communication and Localization Meet. *IEEE Access*. 2022;10:68075–68084. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3186510
18. Wymeersch H. A Fisher Information Analysis of Joint Localization and Synchronization in near Field. *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, 07–11 June 2020, Dublin, Ireland*. IEEE, 2020. p.1–6. DOI:10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145059
19. Nazari M.A., Seco-Granados G., Johannisson P., Wymeersch H. 3D Orientation Estimation with Multiple 5G mmWave Base Stations. *Proceedings of the International Conference on Communications, 14–23 June 2021 Montreal, Canada*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500778
20. Chepuri S.P., Leus G., van der Veen A.-J. Rigid Body Localization Using Sensor Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2014;62(18):4911–4924. DOI:10.1109/TSP.2014.2336621
21. Wen F., Wymeersch H., Peng B., Tay W.P., So H.C., Yang D. A survey on 5G massive MIMO localization. *Digital Signal Processing*. 2019;94:21–28. DOI:10.1016/j.dsp.2019.05.005
22. Fokin G.A. Development and evaluation of transceiver positioning methods in 6G cognitive radio systems. *T-Comm*. 2024;18(6):4–20. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2024-18-6-4-20. EDN:KVNDXU
23. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986;34(3):276–280. DOI:10.1109/TAP.1986.1143830
24. Fortunati S., Grasso R., Gini F., Greco M.S., LePage K. Single snapshot DOA estimation by using compressed sensing. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2014;1(120):1–17. DOI:10.1186/1687-6180-2014-120
25. Wan L., Sun Y., Sun L., Ning Z., Rodrigues J.J.P.C. Deep Learning Based Autonomous Vehicle Super Resolution DOA Estimation for Safety Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;22(7):4301–4315. DOI:10.1109/TITS.2020.3009223
26. Dardari D., Chong C.-C., Win M. Threshold-Based Time-of-Arrival Estimators in UWB Dense Multipath Channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2008;56(8):1366–1378. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050551
27. Giorgetti A., Chiani M. Time-of-Arrival Estimation Based on Information Theoretic Criteria. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2013;61(8):1869–1879. DOI:10.1109/TSP.2013.2239643
28. Jiang F., Ge Y., Zhu M., Wymeersch H. High-dimensional Channel Estimation for Simultaneous Localization and Communications. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 29 March – 01 April 2021, Nanjing, China*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417496
29. Fei Z., Li B., Yang S., Xing C., Chen H., Hanzo L. A Survey of Multi-Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(1):550–586. DOI:10.1109/COMST.2016.2610578
30. Koike-Akino T., Wang P., Pajovic M., Sun H., Orlik P.V. Fingerprinting-Based Indoor Localization With Commercial MMWave WiFi: A Deep Learning Approach. *IEEE Access*. 2020;8:84879–84892. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2991129
31. Vieira J., Leitinger E., Sarajlic M., Li X., Tufvesson F. Deep convolutional neural networks for massive MIMO fingerprint-based positioning. *Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, PIMRC, 08–13 October 2017, Montreal, Canada*. IEEE; 2017. p.1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2017.8292280
32. Mateos-Ramos J.M., Song J., Wu Y., Häger C., Keskin M.F., Yajnanarayana V., et al. End-to-End Learning for Integrated Sensing and Communication. *Proceedings of the International Conference on Communications, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.1942–1947. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9838308
33. Wu Y., Gustavsson U., Amat A.G.I., Wymeersch H. Low Complexity Joint Impairment Mitigation of I/Q Modulator and PA Using Neural Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2022;40(1):54–64. DOI:10.1109/JSAC.2021.3126024
34. Alzahed A.M., Mikki S.M., Antar Y.M.M. Nonlinear Mutual Coupling Compensation Operator Design Using a Novel Electromagnetic Machine Learning Paradigm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019;18(5):861–865. DOI:10.1109/LAWP.2019.2903787
35. Wu Y., Song J., Häger C., Gustavsson U., Graell i Amat A., Wymeersch H. Symbol-Based Over-the-Air Digital Predistortion Using Reinforcement Learning. *Proceedings of the International Conference on Communications, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.2615–2620. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9839091
36. Kase Y., Nishimura T., Ohgane T., Ogawa Y., Kitayama D., Kishiyama Y. DOA Estimation of Two Targets with Deep Learning. *Proceedings of the 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, WPNC, 25–26 October 2018, Bremen, Germany*. 2018. p.1–5. DOI:10.1109/WPNC.2018.8555814
37. Barthelme A., Utschick W. A Machine Learning Approach to DoA Estimation and Model Order Selection for Antenna Arrays With Subarray Sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2021;69:3075–3087. DOI:10.1109/TSP.2021.3081047

38. Dvorecki N., Bar-Shalom O., Banin L., Amizur Y. A machine learning approach for Wi-Fi RTT ranging. *Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 28–31 January 2019, Reston, USA. 2019. p.435–444. DOI:10.33012/2019.16702
39. Wymeersch H., Marano S., Gifford W.M., Win M.Z. A Machine Learning Approach to Ranging Error Mitigation for UWB Localization. *IEEE Transactions on Communications*. 2012;60(6):1719–1728. DOI:10.1109/TCOMM.2012.042712.110035
40. Jiang C., Shen J., Chen S., Chen Y., Liu D., Bo Y. UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method. *IEEE Communications Letters*. 2020;24(10):2226–2230. DOI:10.1109/LCOMM.2020.2999904
41. Guo X., Li L., Ansari N., Liao B. Knowledge Aided Adaptive Localization via Global Fusion Profile. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018;5(2):1081–1089. DOI:10.1109/JIOT.2017.2787594
42. Burghal D., Ravi A.T., Rao V., Alghafis A.A., Molisch A.F. A comprehensive survey of machine learning based localization with wireless signals. *arXiv:2012.11171*. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2012.11171
43. Studer C., Medjkouh S., Gonultas E., Goldstein T., Tirkkonen O. Channel Charting: Locating Users within the Radio Environment Using Channel State Information. *IEEE Access*. 2018;6:47682–47698. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2866979
44. Fokin G., Vladko A. The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2020;6(4):45–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59. EDN:PYHUMZ
45. Fokin G., Vladko A. Vehicles Positioning with the Fusion of Time of Arrival, Angle of Arrival and Inertial Measurements in the Extended Kalman Filter. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2021;7(2):51–67. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-51-67. EDN:AIEESO
46. Kireev A., Fokin G. Accuracy Evaluation of Local Positioning by Radiomap Building and Inertial Navigation System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(4):54–62. (in Russ.) EDN:YMIHOI
47. Gustafsson F. Particle filter theory and practice with positioning applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2010;25(7):53–82. DOI:10.1109/MAES.2010.5546308
48. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006;13(2):99–110. DOI:10.1109/MRA.2006.1638022
49. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006;13(3):108–117. DOI:10.1109/MRA.2006.1678144
50. Yassin A., Nasser Y., Al-Dubai A.Y., Awad M. MOSAIC: Simultaneous Localization and Environment Mapping Using mmWave Without A-Priori Knowledge. *IEEE Access*. 2018;6:68932–68947. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2879436
51. Barneto C.B., Riihonen T., Turunen M., Koivisto M., Talvitie J., Valkama M. Radio-based Sensing and Indoor Mapping with Millimeter-Wave 5G NR Signals. *Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS, 02–04 June 2020, Tampere, Finland*. 2020. p.1–5. DOI:10.1109/ICL-GNSS49876.2020.9115568
52. Fokin G.A. Beam alignment procedures for 5G NR devices. *Elektrosvyaz*. 2022;2:26–31. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003. EDN:GWPZQH
53. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odhari A.Kh., Fedorenko I.V. Assessing the influence of PRS LTE signal properties on positioning accuracy. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2017;4:94–103. (in Russ.) EDN:YQWNLJ
54. Fokin G. Model of 5G NR Precision Metro Network Positioning Technology. Part 1. Configuration of PRS Signals. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(2):48–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63. EDN:OEXILA
55. Fokin G.A. Model of 5G NR Precision Metro Network Positioning Technology. Part 2. PRS Signal Processing. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(3):80–99. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99 EDN:BRJHYG
56. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odhari A.Kh., Fedorenko I.V. Study of the dependence of the value of the geometric factor of reducing accuracy on the topology of receiving points. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2018;2:99–104. (in Russ.) EDN:XRZIXB
57. Lazarev V., Fokin G. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 1. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(2):88–100. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-88-100. EDN:FFMJWI
58. Fokin G., Lazarev V. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 2. 2D-Simulation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):65–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-65-78. EDN:RJHISC
59. Fokin G., Lazarev V. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 3. 3D-Simulation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2020;6(2):87–102. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-87-102. EDN:FKSYIZ
60. Fokin G.A. 5G network positioning and probabilistic models for assessing its accuracy. *T-Comm*. 2020;14(12):4–17. (in Russ.) EDN:DQRXIK
61. Fokin G.A. *A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Fifth-Generation Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 499 p. (in Russ.) EDN:PQMSQX
62. Fokin G.A. Methodology for identifying line of sight in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial signal processing. *Proceedings of the Radio Research Institute*. 2013;3:78–82. (in Russ.) EDN:RVFDCV
63. Fokin G.A. Simulation modeling of the process of radio wave propagation in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial signal processing. *Proceedings of the Radio Research Institute*. 2013;3:83–89. (in Russ.) EDN:RVFDDF
64. Fokin G.A. Positioning procedures in 5G networks. *Vestnik sviazy*. 2021;11:2–8. (in Russ.) EDN:DEFMNY
65. Faisal A., Sameddeen H., Dahrouj H., Al-Naffouri T.Y., Alouini M.-S. Ultramassive MIMO Systems at Terahertz Bands: Prospects and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020;15(4):33–42. DOI:10.1109/MVT.2020.3022998

66. Stratidakis G., Boulogeorgos A.-A.A., Alexiou A. A cooperative localization-aided tracking algorithm for THz wireless systems. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 15–18 April 2019, Marrakesh, Morocco*. IEEE; 2019. p.1–7. DOI:10.1109/WCNC.2019.8885710
67. Chen H., Aghdam S.R., Keskin M.F., Wu Y., Lindberg S., Wolfgang A., et al. MCRB-based Performance Analysis of 6G Localization under Hardware Impairments. *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.115–120. DOI:10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814598
68. Fokin G.F. Model for searching the topology of range-based local 5G positioning system for a given geometric factor. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2021;4(44):27–38. (in Russ.) DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38. EDN:XHPHAA
69. Fokin G., Kucheryavy A. Deployment of ultra dense network devices in space. Part 1. Models and methods of geometric factor. *Telecom IT*. 2022;10(3):32–59. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-32-59. EDN:PUMZTF
70. Fokin G., Kucheryavy A. Deployment of Ultra Dense Network Devices in Space. Part 2. Search Using Geometric Factor. *Telecom IT*. 2022;10(4):27–37. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37. EDN:YVEMNW
71. Li Y.-N.R., Gao B., Zhang X., Huang K. Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond. *IEEE Access*. 2020;8:13282–13293. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963514
72. Alkhateeb A., Nam Y.-H., Rahman M.S., Zhang J., Heath R.W. Initial Beam Association in Millimeter Wave Cellular Systems: Analysis and Design Insights. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(5):2807–2821. DOI:10.1109/TWC.2017.2666806
73. Qi C., Chen K., Dobre O.A., Li G.Y. Hierarchical Codebook-Based Multiuser Beam Training for Millimeter Wave Massive MIMO. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(12):8142–8152. DOI:10.1109/TWC.2020.3019523
74. Hu A., He J. Position-Aided Beam Learning for Initial Access in mmWave MIMO Cellular Networks. *IEEE Systems Journal*. 2022;16(1):1103–1113. DOI:10.1109/JSYST.2020.3027757
75. Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(4):44–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU
76. Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 2. Model of a Set of Radio Links. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(5):43–64. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64. EDN:QPZIOK
77. Han C., Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band. *IEEE Communications Magazine*. 2018;56(6):96–101. DOI:10.1109/MCOM.2018.1700898
78. Garcia N., Wymeersch H., Slock D.T.M. Optimal Precoders for Tracking the AoD and AoA of a mmWave Path. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018;66(21):5718–5729. DOI:10.1109/TSP.2018.2870368
79. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019;67(6):1620–1635. DOI:10.1109/TSP.2019.2894789
80. Björnson E., Wymeersch H., Matthiesen B., Popovski P., Sanguinetti L., de Carvalho E. Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2022;39(2):135–158. DOI:10.1109/MSP.2021.3130549
81. Fokin G.A., Kucheryavy A.E., Gorbacheva L.S. *Software Module for Studying the Dependence of the Accuracy of Positioning and Orientation of Devices in Space on the Dimension of the Antenna Array at the Base Station in Ultra-Dense Networks of the Millimeter and Terahertz Range*. Patent RU no. 2023682152, 12.10.2023. (in Russ.) EDN:NIDIYO
82. Fokin G.A., Volgushev D.B. Models of spatial selection in beamforming based on positioning in ultra-dense millimeter-wave radio access networks. *Computer Research and Modeling*. 2024;16(1):195–216. DOI:10.20537/2076-7633-2024-16-1-195-216. EDN:ENQMBZ

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена после рецензирования 20.10.2024; принята к публикации 22.10.2024.

The article was submitted 10.09.2024; approved after reviewing 20.10.2024; accepted for publication 22.10.2024.

Информация об авторе:

ФОКИН
Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Научная статья

УДК 004.822, 519.6

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-80-91>

Применение алгоритма стаи серых волков и нейронных сетей для решения дискретных задач

- ✉ Андрей Анатольевич Лисов ✉, lisov.andrey2013@yandex.ru
- ✉ Александр Григорьевич Возмилов, vozmiag@rambler.ru
- ✉ Кирилл Александрович Гундарев, pioneer03.95@mail.ru
- ✉ Аскар Зайдакбаевич Кулганатов, kulganatov97@gmail.com

Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, 454080, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В последние десятилетия метаэвристические методы оптимизации стали популярными для решения сложных задач, требующих поиска глобальных экстремумов. Алгоритмы, такие как генетический алгоритм (GA), оптимизация колоний муравьев (ACO), оптимизация роя частиц (PSO), а также более современные подходы, как алгоритм косячьей стаи (CSO) и оптимизация стаи серых волков (GWO), демонстрируют высокую эффективность, но их применение зачастую ограничивается условиями непрерывности и дифференцируемости целевых функций. Это представляет собой вызов при решении задач с дискретными данными, где такие требования не соблюдаются. В данном контексте особую актуальность приобретает поиск методов, позволяющих адаптировать метаэвристические алгоритмы для работы с дискретными функциями.

Цель исследования направлена на проверку гипотезы о возможности использования нейронной сети, обученной на ограниченном наборе дискретных данных, в качестве аппроксимации функции, достаточной для корректного выполнения алгоритма GWO при поиске глобального минимума.

Методы. Исследование основано на анализе существующих подходов и экспериментальной проверке гипотезы на двух тестовых функциях: линейной функции и функции Бута, которые широко применяются в качестве стандартов для оценки производительности алгоритмов оптимизации. Для получения результатов проведены численные эксперименты с использованием нейронных сетей в качестве аппроксимирующей модели.

Решение. В ходе экспериментов проведен анализ применимости нейронных сетей для аппроксимации дискретных функций, показавший успешность данного подхода. Было установлено, что нейронные сети могут с высокой точностью аппроксимировать дискретные функции, создавая условия для успешного поиска глобального минимума с использованием алгоритма GWO.

Новизна. Впервые предложена и проверена гипотеза о применении нейронных сетей для аппроксимации целевых функций в задачах метаэвристической оптимизации на дискретных данных. Это направление ранее не получило должного освещения в научной литературе, что придает ценность полученным результатам и подтверждает эффективность предложенного подхода.

Значимость. Результаты исследования открывают новые перспективы для применения алгоритмов, таких как GWO, в задачах оптимизации, основанных на дискретных данных, расширяя возможности метаэвристических методов и способствуя их внедрению в более широкий класс прикладных задач, включая задачи, где применение других методов ограничено.

Ключевые слова: оптимизация, GWO, нейронные сети, метаэвристика, поиск глобального минимума

Ссылка для цитирования: Лисов А.А., Возмилов А.Г., Гундарев К.А., Кулганатов А.З. Применение алгоритма стаи серых волков и нейронных сетей для решения дискретных задач // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 80–91. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-24-35. EDN:BEODCG

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-80-91>

Application of the Gray Wolf Optimization Algorithm and Neural Networks for Solving Discrete Problems

✉ Andrey A. Lisov, lisov.andrey2013@yandex.ru

Alexander G. Vozmilov, vozmiag@rambler.ru

Kirill A. Gundarev, pioneer03.95@mail.ru

Askar Z. Kulganatov, kulganatov97@gmail.com

South Ural State University (NRU),
Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

Annotation

Relevance. In recent decades, metaheuristic optimization methods have become popular for solving complex problems that require searching for global extrema. Algorithms such as genetic algorithm (GA), ant colony optimization (ACO), particle swarm optimization (PSO), as well as more modern approaches such as cat pack optimization (CSO) and gray wolf pack optimization (GWO) demonstrate high efficiency, but their application is often limited by the conditions of continuity and differentiability of the objective functions. This is a challenge when solving problems with discrete data, where such requirements are not met. In this context, the search for methods that allow adapting metaheuristic algorithms to work with discrete functions is of particular relevance.

Aim. The study is aimed at testing the hypothesis about the possibility of using a neural network trained on a limited set of discrete data as an approximation of a function sufficient for the correct execution of the GWO algorithm when searching for a global minimum. The implementation of this hypothesis can significantly expand the scope of GWO, making it available for a wider range of problems where functions are defined on discrete sets.

Methods. The study is based on the analysis of existing approaches and experimental verification of the hypothesis on two test functions: a linear function and a Booth function, which are widely used as standards for evaluating the performance of optimization algorithms. Numerical experiments were conducted using neural networks as an approximating model to obtain the results.

Solution. During the experiments, an analysis of the applicability of neural networks for approximating discrete functions was carried out, which showed the success of this approach. It was found that neural networks can approximate discrete functions with high accuracy, creating conditions for a successful search for a global minimum using the GWO algorithm.

Novelty. For the first time, a hypothesis was proposed and tested on the use of neural networks for approximating objective functions in metaheuristic optimization problems on discrete data. This direction has not previously received due coverage in the scientific literature, which adds significance to the obtained results and confirms the effectiveness of the proposed approach.

Practical significance. The results of the study open up new prospects for the application of algorithms such as GWO in optimization problems based on discrete data, expanding the capabilities of metaheuristic methods and facilitating their implementation in a wider class of applied problems, including problems where the use of other methods is limited.

Keywords: optimization, GWO, neural networks, metaheuristics, search for a global minimum

For citation: Lisov A.A., Vozmilov A.G., Gundarev K.A., Kulganatov A.Z. Application of the Gray Wolf Optimization Algorithm and Neural Networks for Solving Discrete Problems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):80–91. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-24-35. EDN:BEODCG

Введение

Метаэвристические методы оптимизации становятся все более распространенными среди ис-

следователей благодаря своей простоте и расширяемости. Некоторые из них, такие как генетический алгоритм (GA, аббр. от англ. Genetic Algorithm)

[1], оптимизация колоний муравьев (ACO, *аббр. от англ.* Ant Colony Optimization) [2], оптимизация роя частиц (PSO, *аббр. от англ.* Particle Swarm Optimization) [3], алгоритм кошачьей стаи (CSO, *аббр. от англ.* Cat Swarm Optimization) [4] и др. стали часто применяться в прикладных задачах [5–7].

Gray Wolf Optimization (GWO) – это относительно новый алгоритм оптимизации, основанный на социальной иерархии и охотничьем поведении серых волков в природе [8]. Алгоритм довольно популярен и имеет несколько модификаций и улучшений. В исследовании [9], например, предлагается модифицированный алгоритм GWO, в котором используется хороший баланс между разведкой и окружением глобального минимума агентами, модифицированный вариант алгоритма GWO для оптимизации многокритериальных задач [10] и его бинарная версия для решения проблемы выбора признаков [11].

В результате проведенного анализа существующих публикаций было выявлено, что данный алгоритм можно успешно использовать для решения многих инженерных и исследовательских задач. В частности, он может быть применен в качестве функции оптимизации при обучении нейронных сетей и для решения проблем планирования. Тем не менее стоит отметить, что ни в одной из приведенных далее статей не упоминалось о возможности дополнительного использования и, одновременно, улучшения алгоритма GWO. В частности, речь идет о применении не явно заданной функции, как было указано в [8], а нейронной сети, обученной на дискретных данных.

Таким образом, целью этого исследования является проверка гипотезы о том, что даже на ограниченном количестве дискретных данных, не содержащих глобальный минимум, можно обучить нейронную сеть, которая успешно будет использована в качестве исследуемой функции алгоритмом GWO для поиска данного значения. Ведь, как известно, нейронные сети глубокого обучения позволяют решать широкий спектр прикладных задач [12–15], подстраиваясь при помощи внутренних весов под не явно выраженные свойства, признаки и характеристики объектов для предсказания при внесении в систему новых ранее не полученных данных.

1. Исследование применения алгоритма GWO

Цель данного раздела – проверить наличие статей и иных исследований, которые уже высказали идею, озвученную ранее, и проверили ее на практике. Далее будут рассмотрены приложения алгоритма в целях машинного обучения (тренировки нейронных сетей, кластеризации) и инженерного использования (способы применения в распределяющих сетях, в робототехнике). Первые два спосо-

ба будут рассмотрены с точки зрения связки алгоритма GWO и нейронных сетей (НС) для проверки идеи поиска минимума при помощи НС, а остальных приложениях – с целью проверки вида заданной функции, для которой требуется найти оптимум.

1.1. Применение для целей машинного обучения

Алгоритм GWO применялся в различных приложениях машинного обучения. Большинство этих приложений делятся на 4 основные категории:

- 1) выбор признаков;
- 2) обучение нейронных сетей;
- 3) оптимизация машин опорных векторов (SVM, *аббр. от англ.* Support Vector Machines);
- 4) приложения кластеризации.

1.1.1. Выбор признаков

Выбор признаков является ключевым этапом в машинном обучении и анализе данных. Этот процесс направлен на уменьшение числа характеристик, выделение наиболее значимых и устранение лишних, шумных или нерелевантных признаков. Выявление оптимального набора признаков считается сложным из-за огромного пространства поиска.

В [16] был предложен метод-обертка, в котором бинарная версия алгоритма GWO объединяется с методом k -ближайших соседей (k -NN) для оценки потенциальных подмножеств признаков. В дальнейшем, в [17] авторы расширили свою предыдущую работу, проведя всестороннее исследование по применению двух подходов бинарного алгоритма GWO для выбора признаков с различными механизмами обновления.

В работе [18] бинарный алгоритм GWO был использован для классификации рака на основе данных о генной экспрессии. В отличие от предыдущих исследований, здесь автор применил алгоритм дерева решений в качестве оценочного средства, используя k -кратную перекрестную проверку и возвращая уровень точности в качестве значения пригодности.

В исследовании [19] был предложен метод сокращения признаков, который использует алгоритм GWO для поиска подмножества признаков, максимизирующих грубую классификационную функцию пригодности на основе заданного набора данных.

1.1.2. Обучение нейронных сетей

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой модели обработки информации, созданные по аналогии с биологическими нервными системами. Благодаря своей способности эффективно выявлять нелинейные зависимости и динамические изменения, ИНС широко используются как в исследовательских, так и в практиче-

ских целях. Однако их производительность существенно зависит от структуры сети и весовых коэффициентов связей между нейронами, которые могут быть оптимизированы с помощью метаэвристических алгоритмов, включая алгоритм GWO.

В исследовании [20] автор применил алгоритм GWO для обучения многослойного перцептрона (MLP, *аббр. от англ. Multilayered Perceptron*), одного из наиболее популярных типов нейронных сетей. В этом исследовании алгоритм GWO использовался для оптимизации весов и смещений в одном скрытом слое MLP.

Подобный подход был реализован в работе [21], где метод обучения на основе алгоритма GWO был протестирован на трех различных наборах данных и сравнен с алгоритмами PSO, гравитационного поиска (GSA, *аббр. от англ. Gravitational Search Algorithm*) и гибридным алгоритмом на основе популяции (PSOGSA).

В исследовании [22] была применена модифицированная версия алгоритма GWO для нейронных сетей с радиальной базисной функцией (RBFN, *аббр. от англ. Radial Basis Function Network*), названная q -гауссовыми радиальными базисными сетями функциональных связей (RBFLN).

1.1.3. Оптимизация машин опорных векторов (SVM)

Алгоритм SVM считается одним из наиболее мощных классификаторов и регрессоров. Этот метод был разработан В. Вапником [23, 24]. Для достижения максимальной производительности алгоритма SVM требуется настройка двух гиперпараметров: параметра штрафа за ошибку "C" и параметров ядра (kernel). Обычно эта задача решается с помощью простого или исчерпывающего поиска по сетке, однако данный метод неэффективен из-за значительного времени, необходимого для оценки всех возможных комбинаций. В ряде публикаций [25–27] для настройки гиперпараметров SVM применялся алгоритм GWO.

1.1.4. Кластеризация

Кластеризация представляет собой важную задачу в машинном обучении и анализе данных, целью которой является разделение данных на несколько групп, обладающих схожими характеристиками. В литературе часто встречаются метаэвристические подходы к кластеризации, предлагаемые в качестве альтернативы классическому алгоритму k -средних, одному из наиболее известных методов кластеризации. Алгоритм k -средних сильно зависит от начального выбора центроидов и склонен попадать в ловушки локальных минимумов. В этом контексте в работах [28, 29] был разработан алгоритм кластеризации на основе GWO, направленный на преодоление недостатков алгоритма k -средних.

1.2. Инженерные приложения

Очень важной областью оптимизации является инженерия. Она имеет множество важнейших приложений, которые напрямую влияют на качество жизни людей. Алгоритм GWO имеет различные адаптации для самых разных инженерных приложений, включая проектирование и настройку регуляторов, проблемы распределения электроэнергии, робототехнику и планирование пути, а также многие другие задачи.

1.2.1. Задачи информационных коммуникаций

Решая проблему покрытия в беспроводной сенсорной сети (WSN, *аббр. от англ. Wireless Sensor Networks*), авторы статьи [30] предложили вариант алгоритма GWO под названием Herds GWO (HGWO) для оптимизации покрытия датчиков WSN. Целевая функция их подхода учитывает перекрытия покрытия и дыры развертывания WSN. По сравнению с GA и классическим алгоритмом GWO, HGWO показал более высокую способность находить качественные решения с точки зрения хорошего покрытия в течение разумного времени вычислений.

В работе [31] разработаны модель и метод для бессерверной архитектуры, которые предусматривают миграцию групп микросервисов на подвижные совокупности устройств туманных вычислений с использованием алгоритма GWO. Этот алгоритм позволяет эффективно определять подходящие группы устройств для последующей миграции типовых микросервисов.

В статье [32] была рассмотрена проблема поддержки и снижения коэффициента доставки пакетов, возникающая вследствие недостаточного учета пропускной способности и производительности сети. Для решения этой проблемы в базовой модели маршрутизации предложен гибридный алгоритм оптимизации, сочетающий алгоритмы Firefly и GWO, которая улучшает производительность за счет эффективного сочетания локальной и глобальной оптимизации поиска.

1.2.2. Проектирование и настройка регуляторов

В данном разделе рассмотрено применение алгоритма GWO для настройки параметров различных типов регуляторов: интегрального (И), пропорционально-интегрального (ПИ), и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД).

В статье [33] авторы использовали алгоритм GWO для оптимизации параметров ПИ-регулятора в замкнутой системе регулирования давления. Экспериментальные результаты показали, что алгоритм GWO превосходит другие оптимизаторы, такие как GA и PSO.

В исследовании [34] алгоритм GWO был применен для настройки параметров ПИД-регулятора в

системе магнитной левитации для управления подъемом металлического шара. По сравнению с классическим методом настройки Циглера – Николса, алгоритм GWO продемонстрировал более высокую эффективность.

1.2.3. Проблемы с распределением электроэнергии

Распределение электроэнергии является классом задач оптимизации, характеризующимся высокой степенью нелинейности и невыпуклости, а также ограничениями, связанными с поиском оптимального распределения нагрузки для управления и планирования текущих ресурсов. Эта задача представляет собой специфический тип оптимизации, сложность которого возрастает с увеличением числа планируемых системных блоков. Первоначальное применение оптимизатора GWO для решения этой задачи было предложено в [35]. В работе [36] было разработано еще одно приложение, в котором использовалась диспетчеризация выбросов с применением алгоритма GWO.

1.2.4. Робототехника и планирование пути

В технологиях робототехники был предложен многокритериальный подход GWO для оптимизации планирования пути робота [37]. В качестве минимизации использовались две цели, которые управляют расстоянием и плавностью пути. Они выполнили ряд симуляций в различных статических средах. Результаты моделирования показали, что предложенный подход позволил обеспечить роботу оптимальный путь для достижения цели, не сталкиваясь с препятствиями.

Схожую работу провели в [38]: авторы предложили алгоритм GWO для решения проблемы планирования траектории движения беспилотных боевых летательных аппаратов. Они рассмотрели три случая проблем с планированием пути в разных измерениях. Цель состоит в том, чтобы найти безопасный путь, избегая опасных зон и минимизируя затраты на топливо.

1.2.5. Планирование

Для сварочного производства в работе [39] предложили многоцелевой дискретный алгоритм GWO для оптимизации планирования процесса сварки с целью минимизировать время ремонта и общую нагрузку на машину.

Итак, результаты анализа публикаций показали, что ранее идея данной статьи не была описана и проверена на практике, поэтому можно приступить к проведению экспериментов.

2. Материалы и методы

2.1. Оптимизатор GWO

Алгоритм GWO – это типичный алгоритм роевого интеллекта, основанный на иерархии лидерства

(рисунок 1) и механизме охоты серых волков в природе. Серые волки считаются высшими хищниками; средний размер группы у них 5–12 особей. В иерархии алгоритма GWO альфа (α) считается наиболее доминирующим членом группы. Волки бета (β) и дельта (δ) подчиняются α и помогают контролировать большинство волков – омега (ω). Волки ω занимают самое низкое положение в иерархии.

Математическая модель охотничьего механизма серых волков состоит из следующих процессов:

- 1) поиск, преследование и приближение к добыче (окружение добычи);
- 2) окружение и изнурение добычи (охота);
- 3) нападение на добычу.

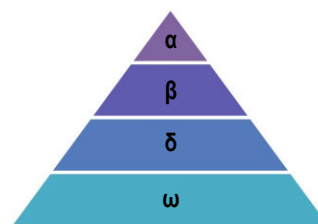


Рис. 1. Иерархия в стае серых волков (доминирование уменьшается сверху вниз)

Fig. 1. Hierarchy of Grey Wolf (Dominance Decreases from Top Down)

Окружение добычи. Во время охоты серые волки окружают добычу, что математически можно записать так:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|, \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, \quad (2)$$

где t – текущая итерация; $\vec{X}_p$ – вектор положения добычи; $\vec{X}$ – вектор положения серого волка; $\vec{A}$ и $\vec{C}$ – векторы коэффициентов:

$$\vec{A} = 2 \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2, \quad (4)$$

где a – линейно уменьшающийся коэффициент от 2 до 0 в ходе итераций; r_1 и r_2 – случайные векторы из диапазона $[0; 1]$.

Охота. Обычно руководят стаей α и β , а δ участвует время от времени. Лучшие решения-кандидаты – α , β , и δ , хорошо знают о потенциальном местонахождении добычи. Остальные поисковые агенты (ω) обновляют свои позиции в соответствии с позицией трех лучших поисковых агентов. Аналитически описанный процесс можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|. \end{aligned} \quad (5)$$

Вектор позиции ω -волка можно вычислить при помощи выражений:

$$\begin{aligned}\vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta, \\ \vec{X} &= \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}.\end{aligned}\quad (6)$$

$$\vec{X} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}.\quad (7)$$

Серые волки заканчивают охоту, нападая на добычу, когда она перестает двигаться.

Нападение на добычу. Чтобы математически смоделировать приближение добычи, мы уменьшаем значение $\vec{a}$. При этом диапазон колебаний также уменьшается на $\vec{a}$. Другими словами, $\vec{A}$ – это случайная величина в интервале $[-a; a]$, где a уменьшается от 2 до 0 в ходе итераций. Когда случайные значения $\vec{A}$ находятся в диапазоне $[-1; 1]$, следующая позиция поискового агента может быть между его текущей позицией и позицией добычи. Когда $|A| < 1$, волки нападают на добычу и происходит уточнение положения глобального минимума исследуемой функции.

2.2. Проверка гипотезы

Для проверки гипотезы было проведено два эксперимента. В первом эксперименте использовался датасет (от англ. Dataset – набор данных), основанный на простой линейной функции первого порядка, не содержащий точки с глобальным минимумом. Целью нейронной сети было обнаружение этой зависимости. Затем нейронная сеть была интегрирована в алгоритм поиска GWO в качестве неявно заданной функции.

Во втором эксперименте условия были аналогичны первому, за исключением того, что исследуемая функция была функцией Бута, используемой для проверки алгоритмов оптимизации. В обоих экспериментах датасеты содержали ограниченное количество данных и не имели точки глобального минимума, что усложняло задачу прогнозирования нейронной сети и повышало чистоту эксперимента.

Весь код, использованный в исследовании, доступен на GitHub одного из авторов (https://github.com/AnLiMan/Grey_Wolf_Optimization). Код написан на языке программирования Python с использованием фреймворка Tensorflow и выполнен на платформе Google Colab.

2.2.1. Датасет линейной функции

Используемый в данной работе датасет, частично отображенный в таблице 1, представляет из себя функцию:

$$Y = 0,5 \cdot A + 2 \cdot B + C, \quad (8)$$

где A, B, C – случайные целые числа.

Из уравнения (1) можно понять, что глобальный минимум функции находится в точке (0;0;0). Датасет имеет размерность – 184 строки, 4 колонки (порядковый номер не включен), не содержит точки (0;0;0) и был создан в «Excel», а после переведен в формат «.csv».

ТАБЛИЦА 1. Датасет линейной функции для обучения нейронной сети

TABLE 1. Dataset of Linear Function for Training Neural Network

№ п/п	A	B	C	Y
1	18	8	0	25
2	10	24	17	70
3	9	13	21	51,5
4	24	25	7	69
...	...	...	...	...
183	24	19	3	53

2.2.2. Датасет функции Бута

Функция Бута в прикладной математике относится к тестовым функциям, которые известны как искусственные ландшафты и являются полезными для оценки характеристик алгоритмов оптимизации наряду с функциями Растригина, Розенброка, Гольдштейна – Прайса и др., она может быть выражена следующим образом:

$$f(x, y) = (x + 2y - 7)^2 + (2x + y - 5)^2. \quad (9)$$

Глобальный минимум функции находится в точке $f(1;3) = 0$. Датасет (таблица 2) имеет размерность – 232 строки, 3 колонки (порядковый номер не включен), не содержит точки (1;3) и также, как и первый, был создан в редакторе «Excel» и после переведен в формат «.csv». Данные помещены в репозиторий «Grey_Wolf_Optimization» под названием «Boot_dataset.csv».

ТАБЛИЦА 2. Датасет для нейронной сети на основе функции Бута

TABLE 2. Dataset for a Neural Network Based on the Booth Function

№ п/п	x	y	f
1	0	0	74
2	0,1	0,1	66,98
3	0,2	0,2	60,32
4	0,3	0,3	54,02
...	...	...	...
231	8,4	-11,2	441,36

2.2.3. Алгоритм работы и модели нейронной сети

Алгоритм работы кода достаточно прост и линеен, поэтому проще отобразить его в виде списка требуемых шагов, а не блок-схемы.

Шаг 1. Инициализация и настройка.

Настройка параметров и гиперпараметров нейронной сети, таких как batch size, оптимизатора (в данном случае "Adam"), функции потерь (MSE,

аббр. от англ. Mean Squared Error), количество эпох обучения и т. д.:

– подключение Google Диска для сохранения и загрузки обученной модели.

Шаг 2. Подключение дополнительных библиотек:

- TensorFlow для работы с нейронными сетями;
- Keras для управления фреймворком TensorFlow;
- Math для работы с математическими функциями;

– Scikit-learn для вычисления метрик полученной модели;

- Matplotlib для построения графиков;
- NumPy для работы с массивами;
- Pandas для работы с датасетом.

Шаг 3. Обработка данных:

- проверка целостности csv-датасета;
- определение размерности и меток данных.

Шаг 4. Преобразование данных.

Преобразование входных данных в массив NumPy: независимые переменные X (в случае с линейной функцией это множество из переменных A, B, C , в случае с функцией Бута – это переменные x, y) и зависимая переменная Y .

Шаг 5. Разделение данных на тренировочную и тестовую выборки в соотношении, заданном настройками из пункта 1.

Шаг 6. Преобразование train_X в тензор TensorFlow с помощью `tf.convert_to_tensor`.

Шаг 7. Нормализация данных.

Нормализация исходных значений в диапазоне $[-1; 1]$ для улучшения сходимости и вычисления градиентов при обучении нейронной сети.

Шаг 8. Задание модели нейронной сети.

Определение архитектуры нейронной сети, включая количество скрытых слоев, нейронов в каждом из них и функции активации (ReLU, tanh, sigmoid и др.) для этого слоя.

Шаг 9. Обучение нейронной сети:

- обучение нейронной сети на тренировочных данных;
- сохранение обученной модели на Google Диск;
- загрузка сохраненной модели для последующего использования.

Шаг 10. Проверка точности предсказаний.

Оценивается точность предсказаний нейронной сети на тестовой выборке, которая не участвовала в процессе обучения.

Вычисление глобального минимума при помощи алгоритмов НС и GWO происходит в программной функции ниже, которая расположена в самом низу модифицированного кода GWO, где `Loading_model` – обученная модель нейронной сети, а метод `predict` возвращает значение Y при заданном X :

```
def obj(x):
    print("Вычисление позиции омеги...")
    return Loading_model.predict(x)
```

Таким образом, алгоритм GWO может свободно запрашивать любые значения в рамках пространства поиска для своих целей оптимизации, чтобы найти глобальный минимум неявно заданной функции.

3. Результаты

На рисунке 2а изображен график, отображающий предсказанные значения НС и реальные значения на обучающей и тестовой выборках. Красная линия разделяет тренировочную ("train") и тестовую ("test") части выборки. Ось x отражает номер пакета данных для анализа (каждая строка датасета без зависимой переменной). Анализ графика показывает, что НС эффективно предсказывает значения функции, демонстрируя высокую степень точности, фактически повторяя истинное значение функции. Рисунок 2с представляет собой увеличенное представление результатов предсказаний на тестовой выборке.

Полученная модель НС легла в основу исходной функции для алгоритма GWO. Границы поиска соответствовали границам исходного датасета, но это не жесткий параметр и может свободно варьироваться.

После 15-ти итераций алгоритм вывел следующее решение (текст, генерируемый программой):

```
-----Итоговое решение-----
A = 0 B = 0,428539 C = 0
Лучший счет = [[0,107]]
```

Это довольно близко к точке $(0;0;0)$ и при этом практически соответствует глобальному минимуму функции по мнению НС (согласно параметру «Лучший счет»). Однако важно отметить, что первый датасет – это простая линейная функция, которую легко предсказать и без помощи НС. Главная цель первого эксперимента – отладка процессов и кода.

Для более корректной проверки был проведен 2-й эксперимент с датасетом на основе функции Бута. В результате были получены графики, показанные на рисунках 2b и 2d. На рисунке 2b красная линия разделяет тренировочную и тестовую выборки. Результаты прогнозирования значений функции Бута на тестовой выборке, показанные на рисунке 2d, показывают, что в этот раз НС справилась хуже, чем при прогнозировании значений линейной функции.

После 15-ти итераций алгоритм GWO вывел следующее решение:

```
-----Итоговое решение-----
A = 1,0399 B = 2,975219
Лучший счет = [[0,164]]
```

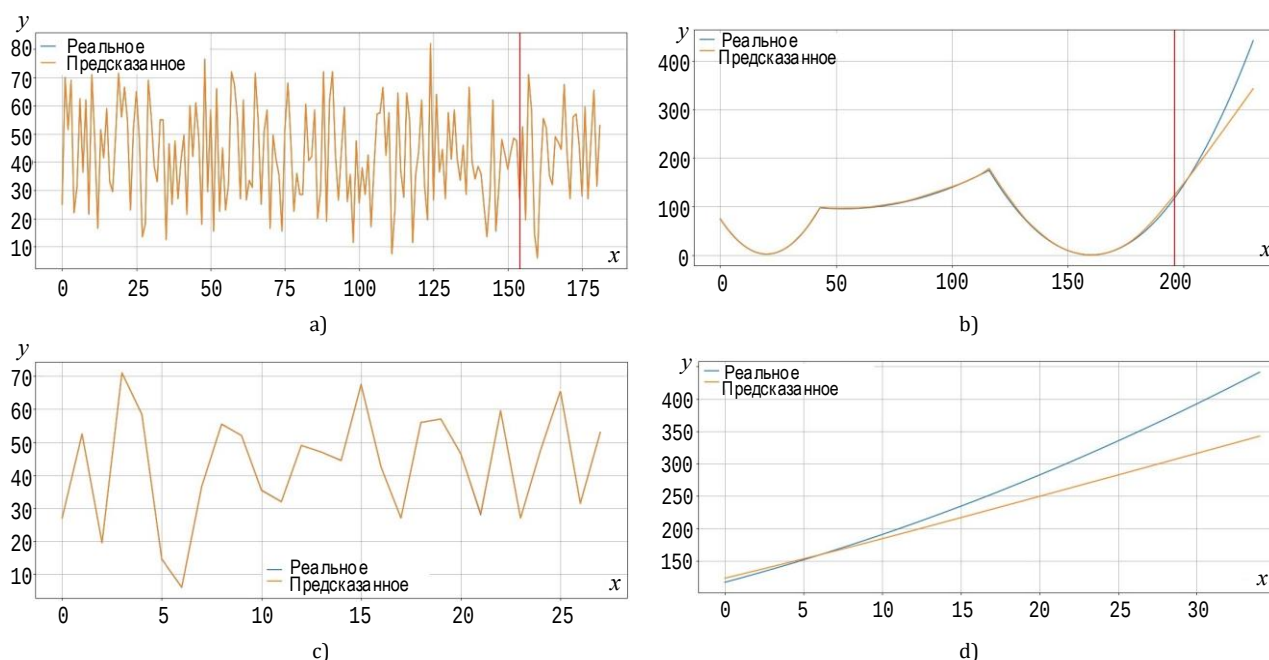


Рис. 2. График предсказанного НС и реального значения на обучающей и тестовой выборке (а, б) и только на тестовой выборке (с, д) на основе линейной функции (слева) и функции Бута (справа)

Fig. 2. Plot of Predicted NN and Actual Value on Training and Test Set (a, b) and Only on Test Set (c, d) Based on Linear Function (Left) and Booth Function (Right)

Напомним, что глобальный минимум функции находится в точке (1;3). Видно, что улучшенный алгоритм GWO хорошо справился со своей задачей как при работе с простыми, так и со сложными функциями даже на ограниченном количестве данных. Это позволяет констатировать, что ранее выдвинутая гипотеза имеет право на существование, и идея может быть применена при решении задач иного характера.

4. Обсуждение

Важно отметить одну ключевую особенность алгоритма GWO. Подобно многим другим метаэвристическим методам, он основывается на стохастическом подходе, то есть использует случайные факторы для поиска решений. Это приводит к тому, что результаты могут варьироваться от запуска к запуску, что сказывается на стабильности финального результата. В настоящем исследовании также наблюдалась эта черта: хотя алгоритм несколько раз практически достигал глобального минимума в точке (0;0;0) в рамках первого эксперимента, чаще всего он сходил на другой точке, которая и была зафиксирована в разделе «Результаты». Похожая картина наблюдалась и во втором эксперименте, что подтверждает случайную природу его поведения.

Особенность алгоритма GWO также заключается в его способе поиска решения. Подробный анализ показал, что целевое решение обычно дости-

гается на 4–5 итерации из 15. Однако это не повод уменьшать их количество, так как параметр $\hat{A}$ (определяющий соотношение между разведкой и окружением добычи) постепенно уменьшается с каждой итерацией, что влияет на процесс поиска. Сокращение количества итераций может снизить эффективность алгоритма, так как на ранних этапах он преимущественно сосредотачивается на поиске, а на более поздних – на более точном нападении на добычу.

Существуют подходы для улучшения этого аспекта. Один из вариантов – использование дополнительного количества итераций, что повышает шансы на более стабильное достижение глобального минимума. Другой вариант – воспользоваться усовершенствованием из исследования [40], в котором предложено изменить структуру алгоритма для улучшения его стабильности и эффективности.

Заключение

В работе был рассмотрен алгоритм оптимизации стаи серых волков (GWO), адаптированный для решения задач аппроксимации функций, заданных дискретными данными, посредством нейронных сетей (НС). Показано, что предложенный подход эффективно обучает нейронные сети для выполнения функции аппроксимации, что, в свою очередь, делает возможным применение метаэвристических алгоритмов даже в условиях, где структура данных не является непрерывной и

гладкой. Экспериментальные результаты подтвердили, что данная методика обеспечивает высокую точность при поиске глобального минимума, даже если в исходных данных отсутствуют значения, указывающие на глобальный минимум функции. Таким образом, алгоритм GWO в сочетании с нейронными сетями продемонстрировал способность решать задачи глобальной оптимизации на дискретных данных, показывая потенциально широкий спектр применения в реальных условиях.

Результаты исследования также указывают на то, что нейронные сети могут выполнять роль аппроксиматоров функций для метаэвристических алгоритмов в условиях ограниченного объема информации. Это расширяет области применения алго-

ритмов оптимизации, позволяя использовать их в задачах, где доступные данные неполны или представлены в виде дискретных точек, как, например, в сценариях управления сложными технологическими процессами или анализа данных IoT.

Будущие исследования могут быть направлены на расширение применения метаэвристических методов для задач с более сложными функциями и дополнительными ограничениями. Также перспективным является изучение гибридных моделей, совмещающих различные подходы искусственного интеллекта, для дальнейшего улучшения эффективности и точности решений в задачах оптимизации на сложных дискретных наборах данных.

Список источников

1. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. 1999. DOI:10.1093/oso/9780195131581.001.0001
2. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization // IEEE Computational Intelligence Magazine. 2006. Vol. 1. Iss. 4. PP. 28–39. DOI:10.1109/MCI.2006.329691
3. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of the International Conference on Neural Networks (Perth, Australia, 27 November – 01 December 1995). IEEE, 1995. PP. 1942–1948. DOI:10.1109/ICNN.1995.488968
4. Chu S.C., Tsai P.W., Pan J.S. Cat Swarm Optimization // Proceedings of the 9th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (Guilin, China, 7–11 August 2006). Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 4099. PP. 854–858. DOI:10.1007/978-3-540-36668-3_94
5. Johnson J.M., Rahmat-Samii Y. Genetic algorithm optimization and its application to antenna design // Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting (Seattle, USA, 20–24 June 1994). IEEE, 1994. Vol. 1. PP. 326–329. DOI:10.1109/APS.1994.407746
6. Afshar A., Massoumi F., Afshar A., Mariño M.A. State of the Art Review of Ant Colony Optimization Applications in Water Resource Management // Water Resources Management. 2015. Vol. 29. PP. 3891–3904. DOI:10.1007/s11269-015-1016-9
7. Parsopoulos K.E., Vrahatis M.N. Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications. Advances and applications. Information Science Reference. 2010. 328 p. DOI:10.13140/2.1.3681.1206
8. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey wolf optimizer // Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 69. PP. 46–61. DOI:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
9. Mittal N., Singh U., Sohi B. Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. 2016. Vol. 2016. P. 7950348. DOI:10.1155/2016/7950348
10. Mirjalili S., Saremi S.M., Mirjalili L.D., Coelho S. Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multicriterion optimization // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 47. PP. 106–119. DOI:10.1016/j.eswa.2015.10.039
11. Hu P., Pan J.S., Chu S.C. Improved Binary Grey Wolf Optimizer and Its application for feature selection // Knowledge-Based Systems. 2020. Vol. 195. P. 105746. DOI:10.1016/j.knosys.2020.105746
12. Vozmilov A., Andreev L., Lisov A. Development of an Algorithm for the Program to Recognize Defects on the Surface of Hot-Rolled Metal // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM, Sochi, Russian Federation, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 1004–1008. DOI:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787116
13. Лисов А.А. Разработка системы электронного дифференциала для электромобилей на основе нейросети глубокого обучения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 351–367. DOI:10.17816/transsyst634127. EDN:DFDXJO
14. Лисов А.А., Кулганатов А.З., Панишев С.А. Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверточных нейронных сетей // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 95–107. DOI:10.17816/transsyst20239195-107. EDN:MAGRJH
15. Возмилов А.Г., Лисов А.А., Урманов В.Г., Синева Г. Н. Определение вида заболеваний, поражающих листья картофеля, с использованием алгоритмов машинного обучения // Вестник НГИЭИ. 2023. № 3(142). С. 7–16. DOI:10.24412/2227-9407-2023-3-7-16. EDN:BXWBRC
16. Emary E., Zawbaa H.M., Grosan C., Hassenian A.E. Feature Subset Selection Approach by Gray-Wolf Optimization // Proceedings of the First International Afro-European Conference for Industrial Advancement (AECIA, Belfast, UK, 2–4 September 2024). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2015. Vol. 334. PP. 1–13. DOI:10.1007/978-3-319-13572-4_1
17. Emary E., Zawbaa H.M., Hassanien A.E. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection // Neurocomputing. 2016. Vol. 172. PP. 371–381. DOI:10.1016/j.neucom.2015.06.083

18. Vosooghifard M., Ebrahimpour H. Applying Grey Wolf Optimizer-based decision tree classifier for cancer classification on gene expression data // Proceedings of the International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE, Mashhad, Iran, 29 October 2015). IEEE, 2015. PP. 147–151. DOI:10.1109/ICCKE.2015.7365818
19. Yamany W., Emary E., Hassanien A.E. New Rough Set Attribute Reduction Algorithm Based on Grey Wolf Optimization // Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Intelligent System and Informatics (AIS, 28–30 November 2015, Beni Suef, Egypt). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2015. Vol. 407. PP. 241–251. DOI:10.1007/978-3-319-26690-9_22
20. Mirjalili S. How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons // Applied Intelligence. 2015. Vol. 43. PP. 150–161. DOI:10.1007/s10489-014-0645-7
21. Mosavi M.R., Khishe M., Ghamgosar A. Classification of sonar data set using neural network trained by gray wolf optimization // Neural Network World. 2016. Vol. 26. Iss. 4. PP. 393–415. DOI:10.14311/NNW.2016.26.023
22. Muangkote N., Sunat K., Chiewchanwattana S. An improved grey wolf optimizer for training q-Gaussian Radial Basis Functional-link nets // Proceedings of the International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC, Khon Kaen, Thailand, 30 July – 01 August 2014). IEEE, 2014. PP. 209–214. DOI:10.1109/ICSEC.2014.6978196
23. Vapnik V. The nature of statistical learning theory. New York: Springer, 2015.
24. Vapnik V.N. An overview of statistical learning theory // IEEE Transactions on Neural Networks. 1999. Vol. 10. Iss. 5. PP. 988–999. DOI:10.1109/72.788640
25. Eswaramoorthy S., Sivakumaran N., Sekaran S. Grey wolf optimization-based parameter selection for support vector machines // Compel: International journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2016. Vol. 35. Iss. 5. PP. 1513–1523.
26. Mustafa Z., Sulaiman M.H., Kahar M.N.M. Training LSSVM with GWO for price forecasting // Proceedings of the International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV, Fukuoka, Japan, 15–18 June 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/ICIEV.2015.7334054
27. Mustafa Z., Sulaiman M.H., Kahar M.N.M. LS-SVM hyperparameters optimization based on GWO algorithm for time series forecasting // Proceedings of the 4th International Conference on Software Engineering and Computer Systems (ICSECS, Kuantan, Malaysia, 19–21 August 2015). IEEE, 2015. PP. 183–188. DOI:10.1109/ICSECS.2015.7333107
28. Kumar V., Chhabra J.K., Kumar D. Grey Wolf Algorithm-Based Clustering Technique // Journal of Intelligent Systems. 2017. Vol. 26. Iss. 1. PP. 153–168. DOI:10.1515/jisys-2014-0137
29. Zhang S., Zhou Y. Grey Wolf Optimizer Based on Powell Local Optimization Method for Clustering Analysis // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2015. Vol. 1. P. 481360. DOI:10.1155/2015/481360
30. Dao T.K., Shieh C.S., Nguyen T.T., Wang H.Y. Enhanced Diversity Herds Grey Wolf Optimizer for Optimal Area Coverage in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the Tenth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, ICGEC, Fuzhou City, China, 7–9 November 2016). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2016. Vol. 536. PP. 174–182. DOI:10.1007/978-3-319-48490-7_21
31. Волков А.Н. Динамические туманные вычисления и бессерверная архитектура: на пути к зеленым ИКТ // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 24–34. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-24-34. EDN:QOELMJ
32. Abdullah H.M., Kumar A.S., Ahmed A.A., Mosleh M.A. Hybrid optimization based on spectrum aware opportunistic routing for cognitive radio ad hoc networks // Informatics and Automation. 2023. Vol. 22. Iss. 4. PP. 880–905. DOI:10.15622/ia.22.4.7. EDN:VPRGZW
33. Li S.X., Wang, J.S. Dynamic Modeling of Steam Condenser and Design of PI Controller Based on Grey Wolf Optimizer // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 1. P. 120975. DOI:10.1155/2015/120975
34. Yadav S., Verma S.K., Nagar S.K. Optimized PID Controller for Magnetic Levitation System // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. Iss. 1. PP. 778–782. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.03.151
35. Wong L.I., Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hong M.S. Grey Wolf Optimizer for Solving Economic Dispatch Problems // Proceedings of the International Conference on Power and Energy (PECon, Kuching, Malaysia, 01–03 December 2014). IEEE, 2014. PP. 150–154. DOI:10.1109/PECON.2014.7062431
36. Song H.M., Sulaiman M.H., Mohamed M.R. An Application of Grey Wolf Optimizer for Solving Combined Economic Emission Dispatch Problems // International Review on Modelling and Simulations. 2014. Vol. 7. Iss. 5. PP. 838–844. DOI:10.15866/iremos.v7i5.2799
37. Tsai P.W., Dao T.K. Robot Path Planning Optimization Based on Multiobjective Grey Wolf Optimizer // Proceedings of the Tenth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, ICGEC, Fuzhou City, China, 7–9 November 2016). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2016. Vol. 536. PP. 166–173. DOI:10.1007/978-3-319-48490-7_20
38. Zhang S., Zhou Y., Li Z., Pan W. Grey wolf optimizer for unmanned combat aerial vehicle path planning // Advances in Engineering Software. 2016. PP. 121–136. DOI:10.1016/j.advengsoft.2016.05.015
39. Lu C., Xiao S., Li X., Gao L. An effective multi-objective discrete grey wolf optimizer for a real-world scheduling problem in welding production // Advances in Engineering Software. 2016. Vol. 99. PP. 161–176. DOI:10.1016/j.advengsoft.2016.06.004
40. Mittal N., Singh U., Sohi B.S. Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. 2016. Vol. 2016. P. 4598. DOI:10.1155/2016/7950348

References

1. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. 1999. DOI:10.1093/oso/9780195131581.001.0001
2. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2006;1(4):28–39. DOI:10.1109/MCI.2006.329691

3. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, 27 November – 01 December 1995, Perth, Australia. IEEE; 1995. p.1942–1948. DOI:10.1109/ICNN.1995.488968
4. Chu S.C., Tsai P.W., Pan J.S. Cat Swarm Optimization. *Proceedings of the 9th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*, 7–11 August 2006, Guilin, China. *Lecture Notes in Computer Science*, vol.4099. Berlin, Heidelberg: Springer; 2006. p.854–858. DOI:10.1007/978-3-540-36668-3_94
5. Johnson J.M., Rahmat-Samii Y. Genetic algorithm optimization and its application to antenna design. *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, 20–24 June 1994, Seattle, USA, vol.1. IEEE; 1994. p.326–329. DOI:10.1109/APS.1994.407746
6. Afshar A., Massoumi F., Afshar A., Mariño M.A. State of the Art Review of Ant Colony Optimization Applications in Water Resource Management. *Water Resources Management*. 2015;29:3891–3904. DOI:10.1007/s11269-015-1016-9
7. Parsopoulos K.E., Vrahatis M.N. Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications. *Advances and applications*. Information Science Reference; 2010. 328 p. DOI:10.13140/2.1.3681.1206
8. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014;69:46–61. DOI:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
9. Mittal N., Singh U., Sohi B. Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2016;2016:7950348. DOI:10.1155/2016/7950348
10. Mirjalili S., Saremi S.M., Mirjalili L.D., Coelho S. Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multicriterion optimization. *Expert Systems with Applications*. 2016;47:106–119. DOI:10.1016/j.eswa.2015.10.039
11. Hu P., Pan J.S., Chu S.C. Improved Binary Grey Wolf Optimizer and Its application for feature selection. *Knowledge-Based Systems*. 2020;195:105746. DOI:10.1016/j.knsys.2020.105746
12. Vozmilov A., Andreev L., Lisov A. Development of an Algorithm for the Program to Recognize Defects on the Surface of Hot-Rolled Metal. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 16–20 May 2022, Sochi, Russian Federation*. IEEE; 2022. p.1004–1008. DOI:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787116
13. Lisov A.A. Development of an electronic differential system for electric vehicles based on deep neural network. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):351–367. (in Russ.) DOI:10.17816/transsyst634127. EDN:DFDXJO
14. Lisov A.A., Kulganatov A.Z., Panishev S.A. Using convolutional neural networks for acousticbased emergency vehicle detection. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):95–107. (in Russ.) DOI:10.17816/transsyst20239195-107. EDN:MAGRJH
15. Vozmilov A.G., Lisov A.A., Urmanov V.G., Sineva G.N. Determination of the type of potato leaves diseases with using machine learning. *Bulletin NGIEI*. 2023;3(142):7–16. (in Russ.) DOI:10.24412/2227-9407-20233-7-16. EDN:BXWBRC
16. Emary E., Zawbaa H.M., Grosan C., Hassenian A.E. Feature Subset Selection Approach by Gray-Wolf Optimization. *Proceedings of the First International Afro-European Conference for Industrial Advancement, AECLA, 2–4 September 2024, Belfast, UK. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol.334. Cham: Springer; 2015. p.1–13. DOI:10.1007/978-3-319-13572-4_1
17. Emary E., Zawbaa H.M., Hassanien A.E. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection. *Neurocomputing*. 2016;172:371–381. DOI:10.1016/j.neucom.2015.06.083
18. Vosooghifard M., Ebrahimpour H. Applying Grey Wolf Optimizer-based decision tree classifier for cancer classification on gene expression data. *Proceedings of the International Conference on Computer and Knowledge Engineering, ICCKE, 29 October 2015, Mashhad, Iran*. IEEE; 2015. p.147–151. DOI:10.1109/ICCKE.2015.7365818
19. Yamany W., Emary E., Hassanien A.E. New Rough Set Attribute Reduction Algorithm Based on Grey Wolf Optimization. *Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Intelligent System and Informatics, AISI, Beni Suef, Egypt, 28–30 November 2015. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol.407. Cham: Springer; 2015. p.241–251. DOI:10.1007/978-3-319-26690-9_22
20. Mirjalili S. How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons. *Applied Intelligence*. 2015;43:150–161. DOI:10.1007/s10489-014-0645-7
21. Mosavi M.R., Khishe M., Ghamgosar A. Classification of sonar data set using neural network trained by gray wolf optimization. *Neural Network World*. 2016;26(4):393–415. DOI:10.14311/NNW.2016.26.023
22. Muangkote N., Sunat K., Chiewchanwattana S. An improved grey wolf optimizer for training q-Gaussian Radial Basis Functional-link nets. *Proceedings of the International Computer Science and Engineering Conference, ICSEC, Thailand, 30 July – 01 August 2014, Khon Kaen*. IEEE; 2014. p.209–214. DOI:10.1109/ICSEC.2014.6978196
23. Vapnik V. *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer, 2015.
24. Vapnik V.N. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1999;10(5):988–999. DOI:10.1109/72.788640
25. Eswaramoorthy S., Sivakumaran N., Sekaran S. Grey wolf optimization-based parameter selection for support vector machines. *Compel: International journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2016;35(5):1513–1523.
26. Mustafa Z., Sulaiman M.H., Kahar M.N.M. Training LSSVM with GWO for price forecasting. *Proceedings of the International Conference on Informatics, Electronics & Vision, ICIEV, 15–18 June 2015, Fukuoka, Japan*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/ICIEV.2015.7334054
27. Mustafa Z., Sulaiman M.H., Kahar M.N.M. LS-SVM hyperparameters optimization based on GWO algorithm for time series forecasting. *Proceedings of the 4th International Conference on Software Engineering and Computer Systems, ICSECS, 19–21 August 2015, Kuantan, Malaysia*. IEEE; 2015. p.183–188. DOI:10.1109/ICSECS.2015.7333107
28. Kumar V., Chhabra J.K., Kumar D. Grey Wolf Algorithm-Based Clustering Technique. *Journal of Intelligent Systems*. 2017;26(1):153–168. DOI:10.1515/jisys-2014-0137

29. Zhang S., Zhou Y. Grey Wolf Optimizer Based on Powell Local Optimization Method for Clustering Analysis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015;1:481360. DOI:10.1155/2015/481360
30. Dao T.K., Shieh C.S., Nguyen T.T., Wang H.Y. Enhanced Diversity Herds Grey Wolf Optimizer for Optimal Area Coverage in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the Tenth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, ICGEC, 7–9 November 2016, Fuzhou City, China. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol.536*. Cham: Springer; 2016. p.174–182. DOI:10.1007/978-3-319-48490-7_21
31. Volkov A.N. Dynamic Fog Computing Towards Green ICT. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(3): 24–34. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-24-34. EDN:QOELMJ
32. Abdullah H.M., Kumar A.S., Ahmed A.A., Mosleh M.A. Hybrid optimization based on spectrum aware opportunistic routing for cognitive radio ad hoc networks. *Informatics and Automation*. 2023;22(4):880–905. DOI:10.15622/ia.22.4.7. EDN:VPRGZW
33. Li S.X., Wang, J.S. Dynamic Modeling of Steam Condenser and Design of PI Controller Based on Grey Wolf Optimizer. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015;1:120975. DOI:10.1155/2015/120975
34. Yadav S., Verma S.K., Nagar S.K. Optimized PID Controller for Magnetic Levitation System. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(1):778–782. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.03.151
35. Wong L.I., Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hong M.S. Grey Wolf Optimizer for Solving Economic Dispatch Problems. *Proceedings of the International Conference on Power and Energy, PECon, 01–03 December 2014, Kuching, Malaysia*. IEEE; 2014. p.150–154. DOI:10.1109/PECON.2014.7062431
36. Song H.M., Sulaiman M.H., Mohamed M.R. An Application of Grey Wolf Optimizer for Solving Combined Economic Emission Dispatch Problems. *International Review on Modelling and Simulations*. 2014;7(5):838–844. DOI:10.15866/iremos.v7i5.2799
37. Tsai P.W., Dao T.K. Robot path planning optimization based on multiobjective grey wolf optimizer. *Proceedings of the Tenth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, ICGEC, 7–9 November 2016, Fuzhou City, China. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol.536*. Cham: Springer; 2016. p.166–173. DOI:10.1007/978-3-319-48490-7_20
38. Zhang S., Zhou Y., Li Z., Pan W. Grey wolf optimizer for unmanned combat aerial vehicle path planning. *Advances in Engineering Software*. 2016. p.121–136. DOI:10.1016/j.advengsoft.2016.05.015
39. Lu C., Xiao S., Li X., Gao L. An effective multi-objective discrete grey wolf optimizer for a real-world scheduling problem in welding production. *Advances in Engineering Software*. 2016;99:161–176. DOI:10.1016/j.advengsoft.2016.06.004
40. Mittal N., Singh U., Sohi B.S. Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2016;2016:4598. DOI:10.1155/2016/7950348

Статья поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена после рецензирования 13.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.

The article was submitted 18.07.2024; approved after reviewing 13.10.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Информация об авторах:

ЛИСОВ
Андрей Анатольевич

аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика»
Южно-Уральского государственного университета (Научно-исследовательского
университета)
 <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>

ВОЗМИЛОВ
Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры
«Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского госу-
дарственного университета (Научно-исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>

ГУНДАРЕВ
Кирилл Александрович

аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины» Южно-Уральского
государственного университета (Научно-исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>

КУЛГАНАТОВ
Аскар Зайдакбаевич

аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы
электропитания» Южно-Уральского государственного университета
(Научно-исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0000-0002-7576-7949>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

**2.3.1 – Системный анализ,
управление и обработка
информации, статистика**

**2.3.6 – Методы и системы защиты
информации, информационная
безопасность**

Научная статья

УДК 004.056:519.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-93-108>

Модели обоснования организационно-технического обеспечения мероприятий по созданию СЗИ объектов информатизации

Олег Сергеевич Авсентьев¹ ✉, osaos@mail.ruВладислав Вячеславович Бутов¹, butov18@mail.ruАндрей Геннадьевич Вальде², avalde@mvd.ru

¹Воронежский институт МВД России,
Воронеж, 394065, Российская Федерация

²Управление МВД России по Амурской области,
Благовещенск, 675000, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность статьи обусловлена необходимостью защиты информации на всех этапах создания информационной системы при отсутствии соответствующего организационно-технического обеспечения. Для обоснования такого рода обеспечения необходимы математические модели, учитывающие условия и случайный характер реализации во времени разнородных процессов обработки информации на каждом из этапов, угроз ее безопасности и защиты от этих угроз. В статье рассматриваются подходы к разработке таких моделей на основе аппаратов теории потоков и теории составных сетей Петри – Маркова, возможности применения которых для моделирования исследуемых процессов ранее не рассматривались.

Цель статьи. Раскрыть содержание вопросов, связанных с обоснованием организационно-технического обеспечения защиты информации на этапах создания информационной системы, показать необходимость и пути количественной оценки угроз ее безопасности и защищенности от этих угроз. Для этого были применены **методы** функционально-структурного анализа, теории вероятностей и теории потоков. В ходе **решения** научной задачи показана актуальность обоснования организационно-технического обеспечения защиты информации на этапах создания информационных систем, разработаны описательные модели процессов ее обработки, приведены временные диаграммы сценариев реализации угроз в условиях отсутствия мер защиты и применения превентивно установленных мер организационно-технического характера, предложены показатели и аналитические соотношения для их расчета.

Научная новизна статьи состоит в том, что в ней впервые рассмотрены вопросы организационно-технического обеспечения защиты информации на этапах создания информационной системы, рассмотрены теоретические аспекты количественной оценки угроз ее безопасности и защищенности от этих угроз на основе теории потоков и перспективы применения теории составных сетей Петри – Маркова.

Значимость (теоретическая). Установлены условия реализации исследуемых процессов и возможности применения теории потоков и аппарата составных сетей Петри – Маркова для их моделирования.

Значимость (практическая). Полученные в работе результаты могут быть использованы при обосновании организационно-технического обеспечения защиты информации на этапах создания информационных систем различных организаций (как государственных, так и негосударственных), для которых реализация угроз на этих этапах может привести к нанесению ущерба их деятельности.

Ключевые слова: информация, информационная система, меры защиты информации, организационно-технические меры защиты, система защиты информации, этапы создания системы защиты информации, объекты защиты, теория потоков

Ссылка для цитирования: Авсентьев О.С., Бутов В.В., Вальде А.Г. Модели обоснования организационно-технического обеспечения мероприятий по созданию СЗИ объектов информатизации // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 93–108. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-92-107. EDN:AKWAWD

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-93-108>

Justification Models of Organizational and Technical Support of Measures to Create Information Protection System of Informatization Objects

Oleg S. Avsentyev ¹ ✉, osaos@mail.ruVladislav V. Butov ¹, butov18@mail.ruAndrei G. Valde ², avalde@mvd.ru

¹Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,
Voronezh, 394065, Russian Federation

²Ministry Department of Internal Affairs of Russia in the Amur Region,
Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation

Annotation

The relevance of the article is due to the need to protect information at all stages of creating an information system in the absence of appropriate organizational and technical support. To justify this kind of provision, mathematical models are needed that take into account the conditions and the random nature of the implementation of heterogeneous information processing processes in time at each stage, threats to its security and protection from these threats. The article discusses approaches to the development of such models based on the apparatus of flow theory and the theory of composite Petri–Markov networks, the possibilities of which for modeling the processes under study have not been previously considered.

The purpose of the article. To reveal the content of issues related to the justification of organizational and technical support for information protection at the stages of creating an information system, to show the need and ways to quantify threats to its security and protection from these threats. For this purpose, the **methods** of functional and structural analysis, probability theory and flow theory were applied. In the course of **solving** the scientific problem, the relevance of substantiating the organizational and technical support of information protection at the stages of creating information systems is shown, descriptive models of its processing processes are developed, time diagrams of threat scenarios are given in the absence of protection measures and in the conditions of using preventive organizational and technical measures, indicators and analytical ratios for their calculation are proposed. **The scientific novelty** of the article consists in the fact that for the first time it examines the issues of organizational and technical support for information protection at the stages of creating an information system, examines the theoretical aspects of quantifying threats to its security and protection from these threats based on flow theory and prospects for applying the theory of composite Petri–Markov networks. **Significance (theoretical).** The conditions for the implementation of the studied processes and the possibility of applying the theory of flows and the apparatus of composite Petri–Markov networks for their modeling are established. **Significance (practical).** The results obtained in the work can be used to justify the organizational and technical provision of information protection at the stages of creating information systems of various organizations (both state and non-state), for which the implementation of threats at these stages may lead to damage to their activities.

Keywords: information, information system, information protection measures, organizational and technical protection measures, information protection system, stages of creating an information protection system, protection objects, flow theory

For citation: Avsentyev O.S., Butov V.V., Valde A.G. Justification Models of Organizational and Technical Support of Measures to Create Information Protection System of Informatization Objects. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):93–108. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-92-107. EDN:AKWAWD

Введение

Защита информации является составной частью работ по созданию информационной системы (ИС) какой-либо организации как государственной, так и негосударственной, осуществляющей деятельность в соответствии с действующим законодательством России, и обеспечивается на всех стадиях (этапах) создания ИС (приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» (в ред. Приказов ФСТЭК России от 15.02.2017 № 27, от 28.05.2019 № 106)), приведенных, например, в [1]. При этом сведения, содержащиеся в передаваемых, принимаемых, обрабатываемых сообщениях в интересах создания ИС и ее системы защиты информации (СЗИ) в помещениях объекта информатизации, могут представлять интерес для нарушителей, поскольку они могут использоваться для реализации угроз безопасности информации (УБИ), как обеспечивающего ресурса деятельности организации, в интересах которой в помещении объекта создается ИС, на этапе эксплуатации системы [2]. Возможность реализации УБИ на различных этапах процесса создания ИС на объекте информатизации в условиях отсутствия сформированной СЗИ и нанесения ущерба в отношении как обрабатываемой информации, так и оборудования, используемого для ее обработки, обуславливает необходимость блокирования этих угроз на каждом из этапов. При этом, как отмечено в Методике оценки угроз безопасности информации, утвержденной ФСТЭК России 05 февраля 2021 г., необходимо «систематически» осуществлять оценку УБИ. Однако в Методике отсутствуют обоснования «систематичности», критериев и методик оценки УБИ на различных этапах существования ИС. Следует отметить, что в соответствии с Приказом № 17 и Методикой, разделение на этапы процесса формирования СЗИ при создании ИС в явном виде не предусмотрено, что вызывает определенные трудности такого разделения, а также трудности оценки УБИ и их блокирования мерами защиты информации, обрабатываемой на различных этапах. Применение для этих целей подхода к формированию СЗИ на основе «базового набора мер защиты» (Приказ № 17) невозможно по ряду причин, связанных с неопределенностью относительно класса защищенности, создаваемой ИС (категории объекта информатизации), ее структурно-функциональных характеристик, используемых информационных технологий, особенностей функционирования средств и систем обработки информации, перечня УБИ, в условиях отсутствия разработанной модели угроз.

Указанные обстоятельства порождают противоречие, разрешение которого на основе существую-

щего методического обеспечения реализации рассматриваемых процессов невозможно ни в практическом, ни в теоретическом плане. С точки зрения практики создания СЗИ, защите подлежит не только информация, обрабатываемая в ИС на этапе эксплуатации, но и информация, обрабатываемая на всех предшествующих и последующих этапах существования ИС и объекта в целом.

В качестве объектов защиты рассматриваются:

- территория объектов информатизации;
- здание (сооружение), в пределах которого ИС размещается;
- защищаемое помещение в этом здании;
- информация и / или информационные ресурсы [3].

При этом на различных этапах состав объектов защиты модифицируется [4], что обуславливает необходимость учета, во-первых, изменения условий реализации УБИ при их оценке на различных этапах (невозможно сделать экспертным путем), во-вторых, отсутствия в настоящее время методического и организационно-технического обеспечения мероприятий, проводимых на этих этапах в интересах создания СЗИ системы и объектов информатизации, а также математических моделей, позволяющих проводить оценку угроз, обеспечить защиту и оценить защищенность информации в рассматриваемых условиях.

Теоретические аспекты данного противоречия состоят в следующем. Исследуемые процессы обработки информации, используемой в интересах создания ИС и объекта информатизации, выполнения нарушителем действий по реализации УБИ в отношении этой информации и оборудования для ее обработки, а также процессы реализации мер защиты, направленные на блокирование угроз, во-первых, взаимосвязаны и реализуются как параллельно, так и последовательно, во-вторых, характеризуются случайной последовательностью смены их состояний во времени, а также наличием параллельно выполняемых действий и логических условий, определяющих возможность реализации. Как показано в [5, 6], оценка УБИ в динамике их реализации и защищенности информации в этих условиях возможна на основе применения теории потоков и аппарата составных сетей Петри – Маркова [7, 8]. Однако возможности их применения для моделирования указанных процессов, реализуемых в интересах обеспечения защиты информации на различных этапах создания ИС и объекта информатизации, ранее не рассматривались. Кроме того, отсутствуют модели обоснования методического и организационно-технического обеспечения защиты информации, обрабатываемой при проведении работ на различных этапах создания СЗИ и объекта информатизации.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность материала данной статьи, посвященной обоснованию такого рода методического и организационно-технического обеспечения мероприятий по защите информации, обрабатываемой в интересах создания ИС и СЗИ на объекте информатизации, показателей для оценки УБИ и ее защищенности от угроз, а также разработке моделей для расчета этих показателей.

1. Описание информации, используемой на различных этапах создания СЗИ на объекте информатизации

Процесс создания ИС представляет собой совокупность упорядоченных во времени, взаимосвязанных, объединенных в стадии и этапы работ, выполняемых в интересах создания ИС, соответствующей заданным требованиям, и осуществляется во всех организациях, участвующих в процессе создания этих систем, в том числе и в организации, выступающей в качестве заказчика [1, 9]. В целях рационального планирования и организации этих работ реализуются информационные процессы по обработке сведений в различных формах их представления. Однако при этом в [1] не предполагается проведение работ по защите информации, в том числе на этапе эксплуатации ИС.

В соответствии с существующим методическим подходом, защита информации осуществляется на всех этапах создания ИС применительно к конкретному объекту защиты с учетом:

- видов обрабатываемой информации и ее материальных носителей;
- структурно-функциональных характеристик создаваемой ИС;
- выявленных уязвимостей в ее составе;
- факторов, влияющих на безопасность как информации, так и оборудования, используемого для ее обработки, которые могут быть применены нарушителем для реализации УБИ (Приказ № 17).

С учетом данного подхода, в [4] предложено разделение процесса создания СЗИ на 6 этапов, соответствующих перечню мероприятий по защите информации, обрабатываемой в процессе реализации этих этапов (Приказ № 17):

$$E = \langle e_i, i = \overline{1,6} \rangle, \quad (1)$$

где e_1 = ⟨формирование требований к защите информации⟩; e_2 = ⟨формирование СЗИ⟩; e_3 = ⟨внедрение СЗИ⟩; e_4 = ⟨аттестация ОИ по требованиям защиты информации⟩; e_5 = ⟨обеспечение защиты информации в ходе эксплуатации объекта информатизации⟩; e_6 = ⟨обеспечение защиты информации в ходе вывода из эксплуатации аттестованного объекта информатизации⟩.

При этом на этапах e_5 и e_6 защита информации осуществляется на основе уже сформированной и аттестованной СЗИ по требованиям к защите, а на этапах $e_1 \div e_4$ выполняются работы, при выполнении которых обрабатывается информация в различных формах ее представления в условиях отсутствия сформированной СЗИ. Часть работ на этапах $e_1 \div e_4$ производится сторонними организациями (разработчик ИС и ее СЗИ; изготовитель и поставщик технических и программных средств), имеющими лицензию на выполнении соответствующих видов деятельности с обеспечением необходимых мер защиты информации, обрабатываемой в процессе ее реализации. В связи с этим в данной статье указанные меры не рассматриваются. Однако комплекс работ по формированию требований к СЗИ ИС, ее разработке (проектированию), внедрению, аттестации на соответствие требованиям безопасности информации и ввод в действие в соответствии с Приказом № 17 [9] осуществляется обладателем информации (заказчиком) в условиях отсутствия сформированной СЗИ, соответствующей требованиям о безопасности информации.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема, отражающая цели выполнения работ и их последовательность на этих этапах, где ЗИ – защита информации; ОИ – объект информатизации; НСД – несанкционированный доступ.

Каждый из этапов схемы (см. рисунок 1), в свою очередь, разделяется на процессы, соответствующие целям выполняемых работ:

$$e_1 = \langle e_{11} \div e_{15} \rangle, \quad e_2 = \langle e_{21} \div e_{23} \rangle, \\ e_3 = \langle e_{31} \div e_{33} \rangle, \quad e_4 = \langle e_{41} \rangle.$$

Для обеспечения защиты информации и оборудования ИС в составе объекта информатизации, в соответствии с Приказом № 17, руководителем организации назначается структурное подразделение или должностное лицо (работник), ответственное за защиту информации в части:

- разработки задания на создание ИС и ее СЗИ (этап e_1);
- включения в документацию на ИС обоснованных требований о защите обрабатываемой информации и контроля их выполнения в процессе экспертизы документации (этап e_2);
- испытаний и приемки как ИС в целом, так и ее СЗИ (этап e_3);
- организации аттестации ИС на соответствие требованиям безопасности информации (этап e_4);
- сопровождения ИС в ходе ее эксплуатации [9].

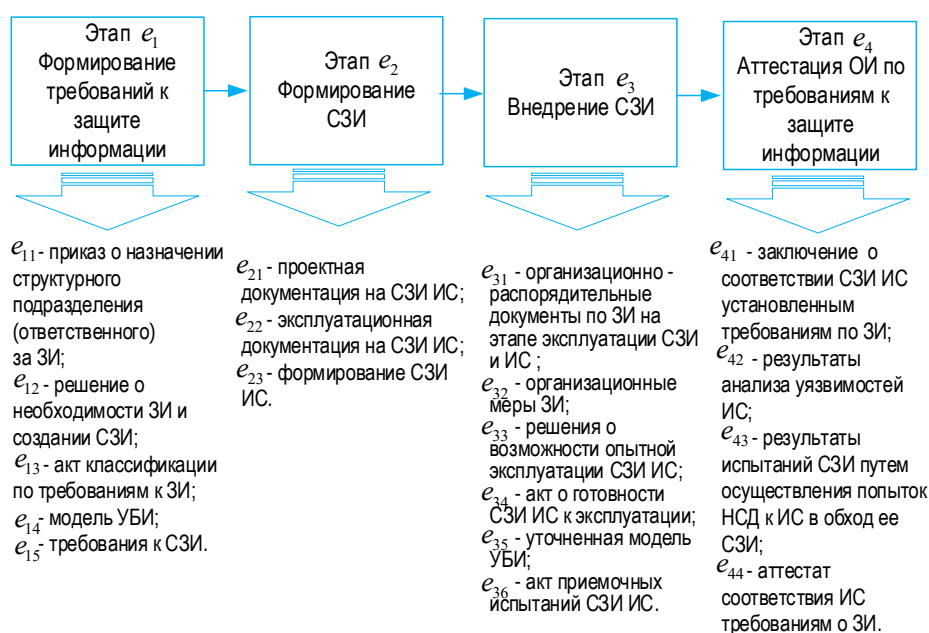


Рис. 1. Цели и последовательность выполнения работ на этапах $e_1 \div e_4$ создания ИС в условиях отсутствия сформированной СЗИ
 Fig. 1. Objectives and Sequence of Work at Stages $e_1 \div e_4$ of Creating an Information System in the Absence of a Formed Information Security System

Как правило, состав и функции лиц, включенных в данное подразделение, определяются соответствующим приказом по организации. При его создании и доведении до исполнителей реализуется процесс обработки информации (e_{11}) как в речевой форме, так и форме документа на бумажном и / или электронном носителе. За счет нарушения конфиденциальности сведений, содержащихся в приказе, могут быть раскрыты, во-первых, цель и задачи создания ИС и ее СЗИ, а также направления деятельности организации, в интересах которой ИС создается, во-вторых, сведения о лицах, допущенных к информационным ресурсам организации, используемым в процессе выполнения работ на различных этапах существования, в том числе, на этапе эксплуатации ИС и ее СЗИ.

Процесс e_{12} реализуется в интересах принятия решения о необходимости защиты информации на основе:

- сведений о видах деятельности, реализуемых в организации, о самом объекте информатизации, в составе которого планируется создание ИС;
- выявления проблем, связанных с обеспечением эффективности деятельности, решение которых возможно за счет создания ИС;
- оценки (правовой, технико-экономической, социальной и т. п.) целесообразности создания ИС и ее СЗИ.

Нарушение конфиденциальности информации, содержащей такого рода сведения, может быть использовано нарушителем при разработке сценариев реализации УБИ в отношении как этих сведений, так и информации, обрабатываемой на этапе

эксплуатации ИС, учитывающих уровень защиты информации на основе создаваемой СЗИ. Сценарии реализации УБИ могут быть скорректированы нарушителем для соответствующих способов их реализации применительно к конкретным объектам воздействия, последовательности выполняемых действий, привлечения необходимых сил и средств, соответствующих его возможностям (потенциалу), а также доступности различных способов реализации УБИ.

Определение класса защищенности ИС (категория объекта информатизации) определяется при реализации процесса e_{13} на основе оценки важности информации, обрабатываемой в ИС в интересах обеспечения деятельности организации и масштаба создаваемой ИС. Важность информации определяется величиной ущерба, связанного с нарушением свойств информации актуальных для организации, в интересах которой создается ИС. При наличии сведений о важности информации нарушитель имеет возможность планирования выделяемых ресурсов для реализации угроз в отношении этой информации и оборудования ИС.

В соответствии с Приказом № 17 и Методикой, процесс e_{14} разработки модели УБИ содержит исходные данные для описания ИС и ее структурно-функциональных характеристик, а также описания возможностей нарушителей (модель нарушителя), уязвимостей ИС, способов реализации угроз и последствий от нарушения свойств безопасности информации.

В связи с тем, что обработка информации, используемой в интересах создания ИС и ее СЗИ, осуществляется, как правило, в помещениях объекта информатизации, то в качестве УБИ целесообразно рассматривать:

- 1) угрозы, связанные с несанкционированным доступом к информации и оборудованию, используемому для ее обработки на различных этапах;
- 2) угрозы утечки этой информации по техническим каналам.

В соответствии с Приказом № 17 в общем случае к основным элементам описания УБИ относятся:

- источник угрозы (нарушитель);
- уязвимости системного и прикладного программного обеспечения ИС (в случае использования для обработки информации в компьютерных системах);
- факторы, воздействующие на безопасность информации (при исследовании возможностей ее утечки по техническим каналам), используемые нарушителем для реализации угроз;
- способы реализации угроз и сценарии несанкционированных действий, выполняемых в соответствии с Методикой в ходе их реализации [10].

С целью выполнения требований о «систематической» оценке УБИ для разработки модели угроз, актуальных для соответствующего этапа создания СЗИ, целесообразно воспользоваться программой, разработанной в интересах автоматизации процесса формирования перечня угроз специалистами ФСТЭК России и представленной в разделе официального сайта «БДУ – формирование перечня угроз» (<https://bdu.fstec.ru/threat-section/shaper-threats>). Однако для проведения оценки необходимо решать ряд задач из их перечня, приведенного в Методике, решение которых невозможно на основе данной программы. К таким задачам относятся: оценка возможности реализации УБИ и определение их актуальности; оценка сценариев реализации УБИ в ИС. В условиях изменений состава объектов защиты при выполнении различных работ на этапах создания СЗИ изменяются и условия для решения этих задач, что затрудняет своевременную выработку адекватных и эффективных мер по защите информации на каждом из этапов.

В процессе оценки УБИ, в соответствии с Методикой, ответственными работниками (далее – работники подразделения) организации используются различные исходные данные, включающие общедоступные сведения, факты использования которых могут быть применены нарушителем для реализации УБИ, обрабатываемой на этапе эксплуатации созданной ИС и ее СЗИ. Так, при использовании программы (<https://bdu.fstec.ru/threat-section/shaper-threats>) сведения о выборе негативных последствий от реализации угроз могут быть применены нарушителем для раскрытия цели и задач

обеспечения защиты информации в ИС и на объекте информатизации, а также для определения актуальных угроз из их общего перечня, реализация которых может причинить ущерб обеспечению деятельности организации. На основе перечня актуальных УБИ и последующего выбора объектов их воздействия, могут быть раскрыты сведения о структуре создаваемой ИС, ее СЗИ и их функциях. Результаты последующего выбора компонентов объектов воздействия могут быть использованы нарушителем для определения способов реализации угроз, например, компьютерных атак на ИС, или угроз утечки информации по техническим каналам. В соответствии с Методикой на основе сведений, используемых на перечисленных этапах формирования модели угроз, нарушитель (внутренний или внешний) может оценить свои возможности (потенциал нарушителей – отдельных физических лиц, организованных преступных групп, организаций – конкурентов, спецслужб иностранных государств и т. п.) по их реализации, а также определить перспективы их повышения, например, путем сговора внешних и внутренних нарушителей.

Формирование требований к СЗИ осуществляется в процессе e_{15} с учетом класса защищенности ИС и разработанной модели угроз. Эти требования, в соответствии с Приказом № 17, включаются в частное техническое задание на создание СЗИ и также содержат сведения, которые могут быть использованы нарушителем при реализации УБИ, обрабатываемой в ИС на этапе ее эксплуатации, в интересах обхода применяемых мер защиты информации и с учетом положений политик обеспечения информационной безопасности организации.

На этапе e_2 работниками подразделения осуществляется контроль проведения разработчиком работ по проектированию (процесс e_{21}), формированию эксплуатационной документации (процесс e_{22}) на СЗИ и непосредственно созданию СЗИ ИС (процесс e_{23}).

В процессе e_{21} лицами, осуществляющими контроль за проектированием, путем обсуждения на совещании рабочей группы рассматриваются состав пользователей, процессов и других субъектов доступа, объектов, подлежащих защите в составе ИС и объектов информатизации, правила разграничения, методы контроля и управления доступом. В соответствии с техническим заданием и требованиями, разработанными в процессе e_{15} , осуществляется согласование мер защиты информации, включаемых разработчиком в состав СЗИ, структуры и размещения ее элементов в составе объекта информатизации с учетом наличия у применяемых для реализации этих мер средств защиты сертификатов на соответствие требованиям по безопасности информации, их соответствия определенному

классу защищенности (процесс e_{13}) ИС, и других параметров СЗИ, определенных в Приказе № 17, осуществляется обсуждение возможных уязвимостей ИС, которые могут привести к возникновению УБИ. В результате реализации угроз утечки речевой информации при выполнении работ в процессе e_{21} нарушителем могут быть раскрыты сведения о СЗИ, режимах ее функционирования и т. п., которые могут быть использованы на этапе эксплуатации ИС и объекта информатизации с целью обхода СЗИ в интересах реализации УБИ. Результаты проектирования СЗИ отражаются в проектной документации на ИС, оформленных на бумажных и электронных носителях.

В процессе e_{22} рассматривается разрабатываемая эксплуатационная документация на СЗИ, включающая документы, содержащие описания: структуры СЗИ; мест размещения элементов этой структуры в помещении объекта информатизации; настроек их программного обеспечения и параметров функционирования мер и средств защиты информации в составе СЗИ; правил эксплуатации СЗИ ИС.

В процессе e_{23} работниками подразделения рассматриваются результаты работ по формированию СЗИ по ее макетированию и тестированию:

- проверка работоспособности средств защиты информации в составе СЗИ и выполнением требований к СЗИ ИС, содержащихся в составе технического задания (процесс e_{15});
- корректировка принятых проектных решений (процесс e_{21}); при этом возможно применение методов моделирования ИС на основе средств вычислительной техники.

Неисполнение конфиденциальности информации о сформированной СЗИ раскрывает сведения, которые могут быть использованы нарушителем для обхода мер защиты при реализации УБИ на этапе эксплуатации ИС и объекта информатизации в целом.

На этапе e_3 при внедрении СЗИ работниками подразделения рассматриваются результаты работ, проводимых разработчиком, в соответствии с проектной (e_{21}) и эксплуатационной (e_{22}) документацией, включающих:

- установку и настройку средств защиты информации в составе СЗИ с учетом корректировки состава ее структуры (e_{23});
- разработку организационно-распорядительных документов по защите информации на этапе эксплуатации СЗИ и ИС объектов информатизации (процесс e_{31});
- внедрение организационных мер защиты информации (процесс e_{32});
- предварительные испытания и опытную эксплуатацию СЗИ (процессы e_{33} и e_{34});

- анализ уязвимостей ИС, уточнение модели УБИ и принятие (дополнение) мер защиты информации по их блокированию (процесс e_{35});
- приемочные испытания СЗИ (процесс e_{36}).

При выполнении работ в процессе e_{31} в речевой форме обсуждаются вопросы, связанные: с управлением создаваемой СЗИ и реагированием на выявленные инциденты, которые могут привести к возникновению УБИ и нарушению функционирования оборудования ИС; с управлением конфигурацией и контролем защищенности информации, содержащейся в ИС, после аттестационных испытаний, а также с обеспечением защиты информации на этапе вывода ИС из эксплуатации. Раскрытие этих сведений позволит нарушителю на этапе эксплуатации СЗИ разрабатывать сценарии реализации УБИ, в том числе с учетом обхода дополненных мер защиты в составе СЗИ. Результаты работ отражаются в организационно-распорядительных документах на ИС и ее СЗИ на этапе эксплуатации.

При реализации процесса e_{32} обсуждаются сведения (в речевой форме) о мерах контроля и ограничения доступа, ограничения прав пользователей, допустимых изменениях условий эксплуатации, состава и конфигурации технических средств и программного обеспечения ИС, о действиях ответственных за реализацию мер защиты информации. Проверка полноты и детальности описания организационных мер защиты осуществляется на основе исследования организационно-распорядительных документов. Раскрытие этих сведений позволит нарушителю на этапе эксплуатации СЗИ ИС скорректировать сценарии реализации УБИ, учитывающие возможности обхода принятых организационных мер защиты.

При реализации процессов e_{33} и e_{34} осуществляется проверка работоспособности и опытная эксплуатация СЗИ ИС, результаты которых оформляются документально. При этом результаты проверки содержат сведения о корректности функционирования этих систем, в том числе с учетом реализованных на предыдущих этапах мер защиты информации, а также о готовности пользователей и администраторов к эксплуатации.

В этапе e_{35} в случае выявления уязвимостей ИС, которые могут привести к возникновению УБИ, не включенных в модель угроз на этапе e_1 (процесс e_{14}), проводится ее уточнение и принимаются дополнительные меры защиты информации, направленные на блокирование угроз, связанных с возможностью эксплуатации нарушителем этих уязвимостей. Результаты анализа уязвимостей оформляются в виде документа на электронном и / или бумажном носителе.

Приемочные испытания СЗИ ИС (процесс e_{35}) включают проверку выполнения требований к СЗИ

в соответствии с техническим заданием на их создание. Результаты проверки также оформляются в виде документа на электронном и / или бумажном носителе.

На этапе e_4 с целью проведения аттестационных испытаний ИС и ее СЗИ осуществляется анализ информации, содержащейся в документах, разработанных на этапах $e_1 \div e_3$ в части их соответствия нормативным требованиям (Приказ № 17). На основе экспертно-документального метода при выполнении работ в процессе e_{41} проводится оценка эксплуатационной документации, организационно-распорядительных документов по защите информации и условий функционирования ИС. В процессе e_{42} проводится анализ уязвимостей, связанных с неправильной настройкой программного обеспечения и средств защиты информации, а в процессе e_{43} осуществляются попытки несанкционированного доступа к ИС в обход ее СЗИ. Результаты работ, выполняемых на этапе e_4 , включаются в протокол и служат основанием для оформления аттестата соответствия ИС и ее СЗИ требованиям о защите информации. Раскрытие сведений, содержащихся в указанных документах, может быть использовано нарушителем с целью срыва функционирования оборудования ИС и ее СЗИ, а также реализации УБИ на этапах их эксплуатации и вывода из эксплуатации.

2. Описание процессов обработки информации на различных этапах создания СЗИ объектов информатизации в условиях реализации нарушителем УБИ

В соответствии с существующими подходами к защите информации в ИС и на объекте информатизации для формирования СЗИ и оценки защищенности информации необходимо:

1) определить объект защиты:

- ограждающие конструкции здания и помещения, в пределах которого располагается объект информатизации;
- помещение в составе объекта информатизации, в пределах которого ИС размещается;
- территория здания и прилегающая к нему, информация и / или информационные ресурсы организации);

2) определить УБИ, актуальные для данного объекта защиты;

3) оценить возможности применения доступных мер защиты информации, направленных на блокирование этих угроз.

Кроме того, как показано в [5–8], необходимо учитывать особенности динамики реализации информационных процессов по обработке информации в ИС и на объекте информатизации, а также УБИ.

При проведении работ, выполняемых в интересах создания СЗИ ИС объектов информатизации на различных этапах $e_1 \div e_4$, реализуются информационные процессы (IPr) по обработке массивов информации в различных формах ее представления, рассматриваемые в качестве объектов защиты:

$IPr^{(vi)}$ – речевая информация;

$IPr^{(di)}$ – информация в виде документов;

$IPr^{(gi)}$ – графическая информация;

$IPr^{(data)}$ – данные и др.

При реализации IPr каждого типа используются соответствующие материальные носители – твердые (бумажные и электронные) и сигнальные (акустические (речевые), электрические, электромагнитные сигналы). Так, содержание приказа о назначении подразделения (e_{11}) может обсуждаться на совещании (мероприятии) путем обмена сообщениями (массива $m_i^{(vi)}$, $i = \overline{1, I}$) в речевой форме с последующим оформлением результатов мероприятия в виде соответствующего документа (протокола) на бумажном или электронном носителе (массивов $m_j^{(dp)}$, $j = \overline{1, J}$ и $m_k^{(de)}$, $k = \overline{1, K}$, соответственно). Для принятия решения о необходимости защиты информации (процесс e_{12}), используемой в интересах деятельности, осуществляется анализ различного рода документов (экономических, финансовых, учредительных и т. п.). Результаты такого анализа могут обсуждаться работниками подразделения на совещаниях в речевой форме ($m_i^{(vi)}$) с последующим оформлением в виде документов ($m_j^{(dp)}$ и $m_k^{(de)}$). Определение класса защищенности ИС (процесс e_{13}) в настоящее время осуществляется на основе экспертных оценок величины ущерба, причиняемого организации (опосредованного ущерба [10]) за счет нарушения основных свойств информации, – прямого ущерба в отношении информации и / или оборудования ИС [10]. При этом осуществляется обсуждение информации ($m^{(vi)}$) в составе подразделения с участием руководителя организации, а результаты оформляются в виде «акта классификации» ($m^{(dp)}$ и $m^{(de)}$). Формирование модели угроз (процесс e_{14}) с использованием программы (<https://bdu.fstec.ru/threat-section/shaper-threats>) осуществляется с выходом на официальный сайт ФСТЭК России в электронном виде (массива $m_l^{(ei)}$, $l = \overline{1, L}$) с использованием компьютера, включенного в сеть Интернет. При этом в помещении, в котором установлен компьютер, выполнение шагов по формированию модели угроз и определение модели нарушителя может осуществляться путем дискуссии ($m_i^{(vi)}$) между работниками – участниками данного процесса, а результаты процесса оформляются в виде документа ($m^{(dp)}$ и $m^{(de)}$) – модели угроз, включающей модель нарушителя.

В процессе разработки технического задания на создание ИС и ее СЗИ (процесс e_{15}) формируются предложения о структуре ИС с учетом ее расположения в помещении объекта информатизации, реализуемых структурными элементами функций, видов обрабатываемой информации, ее материальных носителей и угроз безопасности. Указанные предложения также могут обсуждаться в речевой форме ($m_i^{(vi)}$), а результаты обсуждения оформляются в виде документа – протокола. Документы, создаваемые по результатам реализации процессов $e_{11} \div e_{15}$, оформляются на бумажных и электронных носителях ($m^{(dp)}$ и $m^{(de)}$).

Информационные процессы аналогичных типов ($IPr^{(vi)}$, $IPr^{(di)}$, $IPr^{(gi)}$, $IPr^{(data)}$ и др.) реализуются и при обработке информации, используемой в интересах проведения работ на этапах $e_2 \div e_4$ создания СЗИ ИС в составе объекта информатизации. Как показано в [6], такого рода процессы, во-первых, реализуются во времени, во-вторых, время начала, окончания и продолжительности их реализации случайны, в-третьих, эти процессы, как правило, содержат несколько фрагментов их реализации и пауз между ними, имеющих случайные временные характеристики. Кроме того, в составе этих фрагментов сведения, которые могут представлять интерес для нарушителя с точки зрения реализации УБИ как на этапах $e_1 \div e_4$, так и на этапах e_5 и e_6 существования ИС и ее СЗИ, будут присутствовать с некоторой вероятностью p_{vi} или p_{di} . Указанные обстоятельства обуславливают существенные трудности оценки УБИ и защищенности информации на этих этапах на основе экспертных методов существующего нормативного и методического обеспечения (Приказ № 17 и Методика). Для разработки моделей оценки, учитывающих перечисленные условия реализации исследуемых информационных процессов, воспользуемся подходом, приведенным в [2, 5, 6].

На рисунке 2 в качестве примеров приведены временные диаграммы реализации $IPr^{(vi)}$ и $IPr^{(di)}$ по обработке информации в речевой и документальной формах, соответственно, при обсуждении результатов выполнения работ (процессы $e_{11} \div e_{15}$) на этапе e_1 «Формирование требований к защите информации»: процесс e_{11} – приказ о назначении структурного подразделения (ответственного) за защиту информации (см. рисунок 2а); процессе e_{12} – решение о необходимости защиты информации и создании СЗИ (см. рисунок 2б)

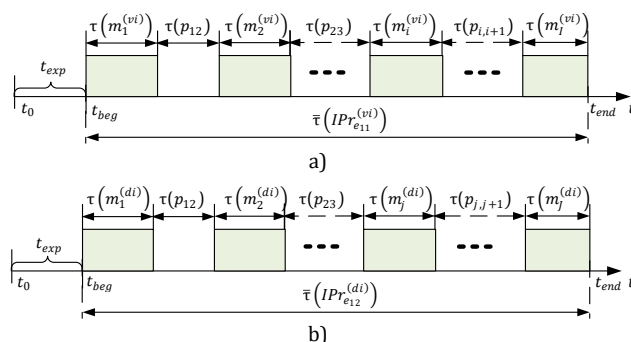


Рис. 2. Временные диаграммы реализации информационных процессов по обработке информации в речевой (а) и документальной формах (б)

Fig. 2. Time Diagrams of the Implementation of Information Processes for Processing Information in Speech (a) and Documentary Forms (b)

На рисунке 2 используются следующие обозначения:

t_0 – время начала рабочего дня в организации;
 t_{exp} – время ожидания начала совещания (мероприятия);
 t_{beg} и t_{end} – времена начала и окончания совещания, соответственно;
 $\tau(m_i^{(vi)})$, $i = \overline{1, I}$ – продолжительность выступления i -го участника совещания;
 $\tau(p_{i,i+1})$, $i = \overline{1, I-1}$ – продолжительность паузы между выступлениями i -го и $(i+1)$ -го участников совещания;
 $\bar{\tau}(IPr_{e_{11}}^{(vi)})$ – среднее время реализации процесса e_{11} по обсуждению на совещании работниками организации содержания приказа руководителя о назначении структурного подразделения, ответственного за защиту информации в ИС, создаваемой в интересах обеспечения деятельности организации;
 $\tau(p_{j,j+1})$, $j = \overline{1, J-1}$ – продолжительность паузы между j -м и $(j+1)$ -м докладами результатов проделанной работы;
 $\tau(m_j^{(di)})$, $j = \overline{1, J}$ – продолжительность j -го доклада работника о результатах проделанной работы, представленных в документальной форме на бумажном и / или электронном носителе (в том числе с использованием компьютеров, включенных в локальную вычислительную сеть (ЛВС) организации в помещении объекта информатизации).

По результатам совещания оформляется протокол, в котором определяется состав подразделения и его руководитель (для крупных организаций), либо ответственное лицо (для малых организаций), а также определяется перечень сведений, содержание которых носит конфиденциальный характер. Далее будем считать, что в состав такого подразделения включаются несколько работников.

При выполнении работ в процессе e_{12} работниками в соответствии с их обязанностями, определенными руководителем подразделения, осуществляется анализ необходимых документов организации на бумажных или электронных носителях (в случае использования в организации компьютеров, включенных в ЛВС) и составляется отчет по соответствующему разделу. Результаты отчета докладываются на совещании руководителю подразделения. При этом анализ содержания документов работниками может осуществляться параллельно во времени, а его результаты докладываются на совещании последовательно с представлением разработанных документов (см. рисунок 2б).

Временные диаграммы, аналогичные представленным на рисунке 2, могут быть использованы для иллюстрации процессов выполнения работ по обработке речевой и документальной информации на других этапах создания СЗИ ИС (процесс e_{14}), в том числе при обсуждении исходных данных вводимых в процессе формирования модели УБИ на различных этапах алгоритма программы ФСТЭК (<https://bdu.fstec.ru/threat-section/shaper-threats>).

В общем виде описание УБИ включает [7]: «наименование угрозы»; «источник угрозы»; «используемая уязвимость (совокупность уязвимостей)»; «сценарий реализации угрозы»; «объект воздействия»; «несанкционированное действие, выполняемое при реализации угрозы»; «время существования угрозы»; «время, необходимое на реализацию угрозы».

На этапах $e_1 \div e_4$ в качестве деструктивного (несанкционированного) действия в отношении информации, обрабатываемой в интересах создания ИС и ее СЗИ, целесообразно рассматривать нарушение конфиденциальности этой информации, поскольку нарушения ее целостности и / или доступности могут быть выявлены легитимными пользователями, что противоречит одному из основных принципов ведения такого рода действий, – принципа негласности [11]. В связи с этим в качестве объекта воздействия следует рассматривать информационные процессы обработки и речевой ($IPr^{(vi)}$) и документальной информации ($IPr^{(di)}$), соответственно. Нарушение конфиденциальности этой информации является результатом реализации угроз ее утечки, во-первых, по техническим каналам утечки информации (ТКУИ) – с использованием технических средств или без их использования, во-вторых, за счет получения физического или логического (через ЛВС) доступа к компьютерам, используемым для создания необходимых документов. В соответствии с Методикой, источником такого рода угроз могут быть как внутренние, так и внешние нарушители, а также внешние нарушители, выступающие в сговоре с внутренними.

Основным фактором, обуславливающим возможность реализации угрозы утечки речевой информации (массива $m^{(vi)}$), является ее передача при реализации в помещении объекта информатизации информационного процесса $IPr^{(vi)}$, а уязвимостью документальной информации (массивов $m^{(de)}$) является ее хранение в памяти компьютеров и передача файлов, содержащих документы, созданные при выполнении работ, по сети ЛВС при реализации информационных процессов $IPr^{(di)}$ или распространение этих документов на бумажных носителях (массивов $m^{(dp)}$) при проведении совещания.

Сценарии реализации рассматриваемых угроз утечки информации определяются применительно к объектам защиты ($IPr^{(vi)}$ и $IPr^{(di)}$) и видам воздействия на них. В соответствии с Методикой, сценарий определяется как последовательность возможных действий, выполняемых нарушителем (внутренним или внешним), имеющим соответствующий уровень возможностей (потенциал), обусловленных наличием в его распоряжении необходимых технических средств для формирования ТКУИ, а также уровень доступа к документам на бумажных носителях или к компьютерам, включенным в ЛВС организации и используемым для создания этих документов и их демонстрации при проведении совещаний. Способом реализации угроз утечки речевой информации (массива $m^{(vi)}$) считается канал ее утечки, в том числе ТКУИ, формируемый внутренним или внешним нарушителем с использованием технических средств приема информативных сигналов или без использования таких средств (формируемый внутренним нарушителем). Возникновение канала утечки информации, обрабатываемой в помещении объекта информатизации организации в интересах создания СЗИ ИС, обусловлено, во-первых, реализацией информационного процесса ($IPr^{(vi)}$ или $IPr^{(di)}$) по обработке информации, представленной в соответствующей форме (речевой или документальной) и подлежащей защите, во-вторых – процесса Pr_u перехвата этой информации нарушителем. В качестве защищаемой информации в данном случае рассматривается речевая ($m^{(vi)}$), содержащая сведения ограниченного распространения, текстовая на бумажном носителе ($m^{(dp)}$), а также файлы на электронных носителях, содержащие такого рода информацию ($m^{(de)}$).

Угрозы утечки документальной информации на бумажных носителях ($m^{(dp)}$) могут быть реализованы за счет применения внутренним нарушителем средств фотофиксации или средств копирова-

ния документов, а в электронном виде файлы, содержащие такого рода информацию ($m^{(de)}$), могут быть перехвачены при их передаче по ЛВС или защищены с использованием вредоносных программ, также внедренных в компьютер внутренним нарушителем.

Если время существования угрозы может быть связано с наличием факторов и / или уязвимостей, которые могут быть использованы для ее реализации, то время, необходимое на ее реализацию, является случайным и в существенной степени зависит от применяемых сценариев и характеризует динамику реализации угрозы.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость при оценке угроз утечки информации, обрабатываемой в интересах создания СЗИ ИС объекта информатизации, и оценке ее защищенности учитывать динамику реализации информационных процессов ($IPr^{(vi)}$ и $IPr^{(di)}$), изменение структурных элементов ИС, используемых в интересах обработки информации, представленной в различном виде (массивов $m^{(vi)}$, $m^{(dp)}$ и $m^{(de)}$), на различных этапах создания ИС и ее СЗИ, а также динамику реализации УБИ на каждом из этих этапов.

Иллюстрация динамики реализации информационных процессов представлена на рисунке 2. Для описания динамики угроз утечки обрабатываемой информации рассмотрим некоторые из множества возможных сценариев их реализации в условиях отсутствия мер защиты.

1. Сценарии реализации угрозы утечки речевой информации внутренним нарушителем:

а) включенным в состав подразделения, выполняющего работы в интересах создания СЗИ, и имеющим доступ на совещания подразделения;

б) выполняющим иные виды деятельности в помещениях организации, смежных с помещениями, в которых проводятся совещания по обсуждению вопросов, связанных с созданием СЗИ, и не допущенным к этим работам.

2. Сценарии реализации угрозы утечки речевой информации внешним нарушителем по ТКУИ [6]:

а) имеющим возможность постоянно находиться в зоне возможного приема информативных сигналов, по параметрам которых может быть раскрыто содержание защищаемой информации, с использованием стационарных и высокотехнологичных технических средств, обеспечивающих выполнение энергетических условий приема;

б) периодически прибывающим в зону возможного перехвата информации с использованием носимых и портативных технических средств, обеспечивающих скрытность их применения.

С учетом вероятностного характера временных характеристик сообщений участников совещания,

и содержания в этих сообщениях сведений, представляющих интерес для нарушителя, как показано в [7], реализация информационного процесса $IPr^{(vi)}$ или $IPr^{(di)}$ может быть представлена в виде потока событий со средней интенсивностью:

$$\bar{\mu}_{vi} = \frac{1}{\bar{\tau}(m^{(vi)}) + \bar{\tau}(p)}, \quad \bar{\mu}_{di} = \frac{1}{\bar{\tau}(m^{(di)}) + \bar{\tau}(p)}.$$

В этих условиях в качестве показателя возможностей утечки информации в течение каждого из процессов $e_{11} \div e_{15}$ выполнения работ на этапе e_1 , по аналогии с [6, 7], будем использовать вероятность $P_{i1}^0(t)$, $i = \overline{1,5}$ перехвата хотя бы одного сообщения, содержащего сведения, представляющие интерес для внутреннего нарушителя, при выполнении работ, проводимых в течение одного из процессов ($e_{11} \div e_{15}$) за заданное время в условиях отсутствия мер защиты.

При экспоненциальном приближении вероятность перехвата сообщения рассчитывается по формуле [6]:

$$\begin{aligned} P_{i1}^0(t) &= 1 - \exp(-\bar{\mu}_{vi} \cdot p_{vi} \cdot t), \\ P_{i1}^0(t) &= 1 - \exp(-\bar{\mu}_{di} \cdot p_{di} \cdot t). \end{aligned} \quad (1)$$

В [7] обоснована правомерность такого приближения при вероятностях $p_{vi} < 0,4$, $p_{di} < 0,4$, а с увеличением этих вероятностей вероятность перехвата соответствующих сообщений $P_{i1}^0(t) \rightarrow 1$.

Если необходимо оценить возможность перехвата не менее N сообщений при выполнении работ проводимых в течение одного из процессов $e_{11} \div e_{15}$, например, на этапе e_1 , то выражение (1) преобразуется к следующему виду [6]:

$$P_{1,\geq N}^0(t) = \sum_{n=N}^M \frac{(\bar{\mu}_{v1} \cdot p_{v1} \cdot t)^n}{n!} \cdot \exp(-\bar{\mu}_{v1} \cdot p_{v1} \cdot t), \quad (2)$$

где M – количество участников совещания; $\bar{\mu}_{v1}$ – средняя интенсивность передачи речевых или документированных сообщений при проведении совещания по результатам выполнения работ в течение одного из процессов $e_{11} \div e_{15}$ на этапе e_1 создания СЗИ ИС; p_{v1} – вероятность того, что в этих сообщениях содержится информация, представляющая интерес для нарушителя.

Для всех $e_{11} \div e_{15}$ процессов вероятность перехвата хотя бы одного сообщения, представляющего интерес для нарушителя, вычисляется по формуле:

$$P_{i,1}^0(t) = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - P_{i,1}^0(t)], \quad (3)$$

для не менее, чем N сообщений:

$$P_{5,\geq N}^0(t) = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - P_{5,\geq N}^0(t)]. \quad (4)$$

Временные диаграммы, характеризующие динамику сценария 16 реализации угроз утечки речевой информации в условиях отсутствия мер защиты, приведены на рисунке 3. Внутренний нарушитель имеет возможность лишь периодически осуществлять перехват информации путем «прослушивания» переговоров из смежного помещения, или при нахождении под каким-либо предлогом у неплотно прикрытой двери, а также в случае отсутствия каких-либо ограничений на нахождение в помещении, в котором осуществляются переговоры, как организационной меры защиты информации.

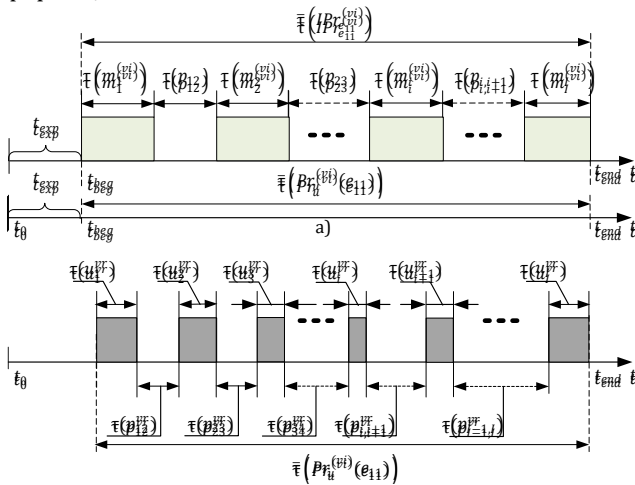


Рис. 3. Временные диаграммы сценария реализации угрозы утечки речевой информации при выполнении работ в процессе e_{11} на этапе e_1 внутренним нарушителем (без мер защиты)

Fig. 3. Time Diagrams of the Scenario for the Implementation of the Threat of Leakage of Speech Information When Performing Work in the e_{11} Process at the e_1 Stage, by an Internal Intruder (without Protective Measures)

На рисунке 3 используются следующие обозначения:

$\tau(u_i^{vr}), i = \overline{1, I}$ – время реализации i -й попытки перехвата речевого сообщения во время проведения совещания;

$\tau(p_{i,i+1}^{vr}), i = \overline{1, I}$ – продолжительность паузы между i -й и $(i + 1)$ попытками перехвата речевого сообщения во время проведения совещания;

$\bar{\tau}(Pr_u^{(vi)}(e_{11}))$ – средняя продолжительность реализации угрозы утечки речевой информации во время проведения совещания по результатам выполнения работ в процессе e_{11} на этапе e_1 формирования СЗИ.

При этом, по аналогии с [6, 7], процесс реализации перехвата информации представляется в виде потока попыток перехвата с некоторой их средней продолжительностью $\bar{\tau}(u^{vr})$ и средней интенсивностью во время проведения совещания по результатам выполненных работ на этапе e_1 создания СЗИ:

$$\bar{\mu}^{vr} = \frac{1}{\bar{\tau}(u^{vr}) + \bar{\tau}(p^{vr})}, \quad \bar{\mu}^{vd} = \frac{1}{\bar{\tau}(u^{vd}) + \bar{\tau}(p^{vd})},$$

где $\bar{\tau}(u^{vr}), \bar{\tau}(u^{vd})$ – средние продолжительности попыток перехвата речевого сообщения и документа, соответственно; $\bar{\tau}(p^{vr}), \bar{\tau}(p^{vd})$ – средние продолжительности пауз между попытками перехвата речевых сообщений и документов, соответственно.

Поток событий, соответствующих прибытию нарушителя к месту возможного перехвата речевых сообщений, описывается средней интенсивностью $\bar{\mu}^{vr}$ и средней продолжительностью $\bar{\tau}(u^{vr})$, а поток событий, соответствующих передаче речевых сообщений во время проведения совещания по результатам выполнения работ в течение соответствующего процесса на этапе e_1 создания СЗИ, содержащих конфиденциальную информацию, – средней интенсивностью $\bar{\mu}_{vi}$ и средней продолжительностью $\bar{\tau}(m^{(vi)})$. Тогда возможность перехвата одного сообщения при отсутствии мер защиты будет определяться вероятностью совпадения этих потоков [6, 7]:

$$P_1^0(t) = 1 - \exp\left[-\bar{\mu}_{vi} \cdot \bar{\mu}^{vr} \left(\bar{\tau}(m^{(vi)}) + \bar{\tau}(u^{vr})\right) p_{vi} t\right]. \quad (5)$$

Возможность перехвата не менее N сообщений определим по выражению (6).

$$P_{1,\geq N}^0(t) = \sum_{n=N}^M \frac{(\bar{\mu}_{v1,j} \cdot \bar{\mu}^{vr} (\bar{\tau}(m^{(vi)}) + \bar{\tau}(u^{vr})) \cdot p_{v1,j} t)^n}{n!} \exp\left(-\bar{\mu}_{v1,j} \cdot \bar{\mu}^{vr} (\bar{\tau}(m^{(vi)}) + \bar{\tau}(u^{vr})) p_{v1,j} t\right). \quad (6)$$

Для оценки возможности утечки речевой (документированной) информации при проведении работ в течение всех процессов на этапе e_1 будем использовать (3 и 4).

Аналогичный подход может быть использован для оценки вероятности реализации угрозы утечки

речевой информации внешним нарушителем. В случае реализации сценария 2а будем применять выражения, аналогичные (2–4), а для сценария 2б – формулы (5 и 6). При этом возможность постоянного нахождения нарушителя в зоне возможного

перехвата информации (при отсутствии адекватных мер защиты) позволяет ему с большей вероятностью раскрыть содержание сообщений, обрабатываемых на этапе e_1 в интересах создания СЗИ ИС объекта информатизации.

3. Описание процессов защиты информации на различных этапах создания СЗИ ИС

В соответствии с существующим нормативным и методическим обеспечением, защита информации от угроз ее утечки должна осуществляться на всех этапах создания ИС и ее СЗИ путем блокирования этих угроз с учетом особенностей описаний сценариев динамики их реализации в различных условиях.

В настоящее время в составе каждого из базовых наборов мер защиты, в соответствии с Приказом № 17, предусмотрены меры защиты технических средств:

- организация контролируемой зоны вокруг объекта информатизации;
- контроль и управление физическим доступом к структурным элементам ИС и СЗИ, к средствам обеспечения их функционирования, в помещения и сооружения, в которых эти элементы и средства установлены;
- размещение устройств отображения информации, исключающее ее несанкционированный просмотр нарушителем.

Очевидно, что меры такого характера могут быть применены для защиты информации, содержащей приведенные выше сведения, и в процессе создания СЗИ объектов информатизации. Следует отметить, что в настоящее время указанные меры могут быть реализованы на основе информационно-сигнализационных систем, представляющих собой совокупность функционально объединенных датчиков различной физической природы, средств вычислительной техники и технических средств извлечения, приема и передачи информации [2], известных (в соответствии с Методикой) как системы охранного мониторинга. Такие системы используются и в государственных организациях, в первую очередь, в интересах реализации мер физической защиты информации путем применения организационных мероприятий и совокупности технических средств, создающих препятствия для проникновения или доступа неуполномоченных физических лиц к объекту защиты, предусматривающих установление режимных, временных, территориальных, пространственных ограничений на условия использования и распорядок работы объекта защиты [1]. Следует отметить, что указанные мероприятия осуществляются с использованием превентивно установленных средств и не позволяет учитывать

динамику параллельно реализуемых процессов обработки информации на различных этапах создания СЗИ, ее перехвата нарушителем как внутренним, так и внешним, и блокирования угроз перехвата информации в этих условиях.

Для защиты информации от утечки в рассматриваемых условиях целесообразно применять организационные и технические меры, адаптированные к выполнению нарушителем действий по реализации процессов $Pr_u^{(vi)}$ и $Pr_u^{(vi)}$. К организационным мерам, по аналогии с [6], следует отнести создание мобильных групп в составе 2–3 человек для физического контроля территории, прилегающей к контролируемой зоне (зданию, помещению) объекта информатизации, в составе которого создается СЗИ и ИС, действующих под управлением администратора информационно-сигнальной системы, контролирующего обстановку на этой территории с применением систем видеонаблюдения (стационарных или мобильных). Мобильные группы проводят осмотр этой территории для обнаружения места, с которого нарушитель (внутренний или внешний) может применять средства перехвата информации. К техническим мерам относятся применение мобильных устройств, которыми оснащаются эти группы, используемых для выявления возможных действий нарушителя, периодически прибывающего в зону возможного перехвата информации в пределах контролируемой зоны и на территории, прилегающей к ней.

Эффект защиты заключается в возможности своевременного обнаружения действий по перехвату информации (или подготовке к перехвату) и оперативного привлечения к пресечению этих действий работников из мобильных групп при их появлении в пределах видимости нарушителя. При этом как организационные, так и технические меры являются опережающими, то есть они оказываются эффективными, если нарушитель в результате их применения не успевает перехватить конфиденциальную информацию. Указанные меры часто применяются на практике, однако оценка угроз утечки информации в условиях применения указанных мер и динамики реализации угроз не проводилась.

Рассмотрим применение некоторых мер защиты при подготовке и реализации IPr^{vi} на этапах создания СЗИ объекта информатизации. Поскольку способом реализации угрозы утечки информации является сценарий реализации канала ее утечки, будем рассматривать применение этих мер применительно к блокированию действий нарушителя по реализации этого сценария. Меры защиты могут быть превентивными, проводимыми до реализации IPr^{vi} , или осуществляемыми в ходе его реализации.

В первом случае, когда соответствующий канал утечки не ликвидируется с вероятностью $1 - p_{det}^{vi}$, где p_{det}^{vi} – вероятность обнаружения канала утечки информации, возможность ее перехвата определяется вероятностью того, что канал не ликвидирован, и временными характеристиками передачи сообщений, содержащих сведения, представляющие интерес для нарушителя в процессе выполнения работ в интересах создания СЗИ.

С учетом (1) вероятность перехвата одного сообщения при обсуждении результатов работ, выпол-

няемых, например, в процессе e_{11} на этапе e_1 создания СЗИ в ходе реализации IPr^{vi} в течение времени t , рассчитывается по формуле [6]:

$$P_{i1}^{ZI}(t) = 1 - \exp[-\overline{\mu_{v1}} \cdot p_{v1} \cdot (1 - p_{det}^{vi}) \cdot t]. \quad (7)$$

Вероятность перехвата не менее N сообщений, содержащих конфиденциальную информацию при обсуждении результатов работ, выполняемых в процессе e_{11} на этапе e_1 создания СЗИ в ходе реализации IPr^{vi} в течение времени t , рассчитывается по формуле (8).

$$P_{i \geq N}^{(ZI)}(t) = \sum_{n=N}^M \frac{[\overline{\mu_{v1}} \cdot p_{v1} \cdot (1 - p_{det}^{vi}) \cdot t]^n}{n!} \exp[-\overline{\mu_{v1}} \cdot p_{v1} \cdot (1 - p_{det}^{vi}) \cdot t]. \quad (8)$$

Для всех $e_{11} \div e_{15}$ процессов вероятность перехвата хотя бы одного сообщения, представляющего интерес для нарушителя, вычисляется как:

$$P_{i,1}^{ZI}(t) = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - P_{i,1}^{ZI}(t)], \quad (9)$$

для не менее, чем N сообщений:

$$P_{5, \geq N}^{ZI}(t) = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - P_{5, \geq N}^{ZI}(t)]. \quad (10)$$

Если меры защиты осуществляются в ходе реализации процессов IPr^{vi} и $Pr_u^{(vi)}$, существует множество логических условий, связанных с необходимостью выполнения различного рода действий в интересах подготовки реализации этих процессов. Как показано в [6], учет этих условий возможен с использованием моделей на основе аппарата составных сетей Петри – Маркова. Разработка таких моделей является предметом дальнейших исследований авторов.

Заключение

Защита информации, используемой в интересах создания ИС, должна осуществляться на всех этапах ее создания. Это связано с тем, что раскрытие содержания как самой информации, так и ее фрагментов, может использоваться нарушителем для реализации УБИ, обрабатываемой в ИС на этапе ее эксплуатации, что может привести к нанесению ущерба деятельности организации, в интересах которой ИС создается.

Сложности реализации мер защиты в отношении информации, обрабатываемой в интересах создания ИС и ее СЗИ, и обоснования организационно-технического обеспечения их реализации на различных этапах их создания, обусловлены отсут-

ствием в настоящее время: описаний взаимосвязанных и параллельно реализуемых процессов обработки этой информации, как объектов защиты; сценариев процессов реализации угроз нарушения ее конфиденциальности на различных этапах, а также процессов защиты информации, учитывающих их реализацию во времени, случайный характер временных признаков различных фрагментов и выполняемых действий, а также наличие различного рода логических условий их реализации. Парирование этих сложностей может быть достигнуто путем представления исследуемых процессов в виде потоков событий на основе теории потоков. В целях учета логических условий динамики исследуемых процессов, определяющих возможность их реализации, возникает необходимость разработки моделей для вычисления их случайных временных характеристик на основе аппарата составных сетей Петри – Маркова.

При описании процессов обработки информации, используемой в интересах создания ИС и ее СЗИ на объекте информатизации, как объектов защиты на различных этапах их создания, возникает ряд вопросов, связанных с определением видов информации, ее материальных носителей, номенклатуры оборудования, используемого для обработки, а также последовательности и содержания работ, выполняемых на каждом из этапов. Изменения объектов защиты обуславливают изменения условий возникновения и реализации угроз нарушения конфиденциальности этой информации и возможностей выполнения нарушителем различных сценариев их реализации.

Оценка УБИ на различных этапах создания ИС и ее СЗИ, а также оценка защищенности информации от реализации этих угроз, невозможны без соответствующего организационно-технического и методического обеспечения. Сегодня такое обеспечение

отсутствует, а его создание связано с необходимостью решения вопросов разработки математических моделей оценки угроз в условиях динамики их реализации с учетом фактора времени и различных логических условий, включающих описательные (вербальные) модели, учитывающие последовательность и содержание действий выполняемых при реализации различного рода процессов обработки информации в различных условиях обстановки, совокупность уязвимостей этих процессов, как объектов защиты, показателей для проведения такой оценки в условиях отсутствия и применения мер защиты, а также аналитических соотношений для их вычисления, обоснования организационно-технического обеспечения в составе организационных и технических мер защиты.

Для оценки УБИ предложено использовать систему количественных показателей. Для расчета таких показателей с учетом фактора времени при отсутствии мер защиты или в условиях применения превентивно установленных мер целесообразно использовать аналитические выражения на основе теории потоков. Приведены примеры применения этого аппарата для количественной оценки угроз утечки речевой и документированной информации для сценариев их реализации внутренним и внешним нарушителем в различных условиях обстановки при отсутствии мер защиты и с учетом применения превентивно установленных мер. Для учета логических условий, определяющих процесс реализации угроз, целесообразно использовать аппарат составных сетей Петри – Маркова.

Список источников

1. ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. М.: Стандартинформ, 2009.
2. Avsentiev O.S., Valde A.G., Konkin Yu.V. Ensuring the Protection of Information in the Process of Creating an Information System of an Informatization Object // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2021. № 3. P. 36.
3. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2007.
4. Авсентьев О.С., Вальде А.Г. К вопросу о формировании системы защиты информации от утечки по техническим каналам, возникающим за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2021. № 2. С. 22–33. EDN:VNLGMX
5. Язов Ю.К., Авсентьев О.С., Авсентьев А.О., Рубцова И.О. Метод оценивания эффективности защиты электронного документооборота с применением аппарата сетей Петри – Маркова // *Труды СПИИРАН*. 2019. Т. 18. № 6. С. 1269–1300. DOI:10.15622/sp.2019.18.6.1269-1300. EDN:FBTRZZ
6. Avsentiev O.S., Avsentiev A.O., Krugov A.G., Yazov Yu.K. Simulation of processes for protecting voice information objects against leakage through the spurious electromagnetic radiation channels using the Petri – Markov nets // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2021. Vol. 8. Iss. 2. PP. 3–24. DOI:10.14529/jcem210201. EDN:VOKXXO
7. Язов Ю.К., Анищенко А.В. Сети Петри-Маркова и их применение для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах. Монография. Воронеж: Кварта, 2020. 173 с.
8. Язов Ю.К., Анищенко А.В., Суховерхов А.С. Основы теории составных сетей Петри-Маркова и их применения для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах. Монография. СПб.: Сциентиа, 2024. 196 с. DOI:10.32415/scientia_978-5-6052111-2-9. EDN:CGTNTU
9. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014.
10. Язов Ю.К., Соловьев С.В. Методология оценки эффективности защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. 258 с. EDN:WVCHKW
11. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие. Под ред. Ю.Н. Лаврухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 536 с.

References

1. GOST 34.601-90. *Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of development*. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (in Russ.)
2. Avsentiev O.S., Valde A.G., Konkin Yu.V. Ensuring the Protection of Information in the Process of Creating an Information System of an Informatization Object. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2021;3:36.
3. GOST R 50922-2006. *Protection of information. Basic terms and definitions*. Moscow: Standartinform Publ.; 2007. (in Russ.)
4. Avsentiev O.S., Valde A.G. To the question of formation of information protection system from leakage through technical channels occurring due to side electromagnetic radiation on informatization objects. *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2021;2:22–33. (in Russ.) EDN:VNLGMX
5. Yazov Yu.K., Avsentiev O.S., Avsentiev A.O., Rubcova I.O. Method for Assessing Effectiveness of Protection of Electronic Document Management Using the Petri and Markov Nets Apparatus. *SPIIRAS Proceedings*. 2019;18(6):1269–1300. (in Russ.) DOI:10.15622/sp.2019.18.6.1269-1300. EDN:FBTRZZ

6. Avsentyev O.S., Avsentyev A.O., Krugov A.G., Yazov Yu.K. Simulation of processes for protecting voice information objects against leakage through the spurious electromagnetic radiation channels using the Petri - Markov nets. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2021;8(2):3–24. DOI:10.14529/jcem210201. EDN:VOKXXO
7. Yazov Yu.K., Anishchenko A.V. *Petri-Markov Networks and Their Application for Modelling Processes of Information Security Threats Implementation in Information Systems*. Voronezh: Kvarta Publ.; 2020. 173 p. (in Russ.)
8. Yazov YU.K., Anishchenko A.V., Suhoverhov A.S. *Fundamentals of the Theory of Composite Petri-Markov Networks and Their Application for Modelling the Processes of Implementation of Information Security Threats in Information Systems*. St. Petersburg: Scientia Publ.; 2024. 196 p. (in Russ.) DOI:10.32415/scientia_978-5-6052111-2-9. EDN:CGTNTU
9. GOST R 51583-2014. *Information protection. Sequence of protected operational system formation. General provisions*. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (in Russ.)
10. Yazov Yu.K., Solov'ev S.V. *Methodology for Assessing the Effectiveness of Information Protection in Information Systems against Unauthorised Access*. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii Publ.; 2023. 258 p. (in Russ.) EDN:WVCHKW
11. Menshakov Yu.K. *Theoretical Foundations of Technical Reconnaissance*. Ed. Yu.N. Lavruhina. Moscow: Bauman MSTU Publ.; 2008. 536 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 21.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved after reviewing 21.10.2024; accepted for publication 23.10.2024.

Информация об авторах:

АВСЕНТЬЕВ Олег Сергеевич | доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности Воронежского института МВД России

БУТОВ Владислав Вячеславович | кандидат технических наук, начальник кафедры информационной безопасности Воронежского института МВД России

ВАЛЬДЕ Андрей Геннадьевич | заместитель начальника – начальник отдела центра информационных технологий, связи и защиты информации Управления МВД России по Амурской области

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.932.2

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-109-118>

Исследование автономной навигации беспилотных летательных аппаратов на основе корреляционных методов сравнения изображений

✉ Павел Юрьевич Беляев, belyaev.edu@gmail.com✉ Игорь Алексеевич Зикратов, zikratov.ia@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Автономная навигация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является одной из ключевых задач в современной аэрокосмической индустрии. В особенности для малоразмерных БПЛА задача автономной навигации становится еще более сложной из-за ограничений по вычислительным ресурсам и возможностям сенсорных систем. Оптимизация методов навигации для таких условий является **актуальной проблемой**, требующей решений, которые могут обеспечить высокую производительность при минимальных затратах ресурсов. Основной целью служит повышение эффективности автономной навигации малоразмерных БПЛА за счет использования корреляционных методов для сравнения изображений. Достижение этой **цели** связано с разработкой и оценкой алгоритмов, которые позволяют обеспечить высокую скорость и точность навигации при ограниченных вычислительных ресурсах. В работе использованы **методы** автокорреляционной функции, корреляции Пирсона, метод на основе индекса структурного сходства изображений и простой нейронной сети для задачи сравнения изображений.

Решение. Исследование показало, что подход на основе автокорреляции демонстрирует наилучшую производительность в условиях слабых вычислительных ресурсов. Он обеспечивает высокую скорость обработки полного изображения и показывает оптимальные результаты по точности обнаружения. В сравнении с другими представленными в работе методами, автокорреляционный подход способен работать не только с зашумленной «эталонной» карты, но и использовать в качестве обнаруженной области и альтернативные области с измененными паттернами.

Научная новизна работы определяется в проведении систематического сравнения различных методов применительно к задаче сравнения изображений для малоразмерных БПЛА с ограниченными вычислительными ресурсами. В отличие от известных работ в области построения корреляционно-экстремальных систем, данное исследование ориентировано на использование «эталонной карты» и искомой области, представляющих собой два разных изображения одного и того же участка местности, взятых из различных источников. Это ключевое различие, так как большинство методов не обладает высокой эффективностью обработки таких изображений, на которых паттерны могут значительно варьироваться.

Практическая значимость разработанного алгоритма состоит в том, что предложенный метод на основе автокорреляции может использоваться разработчиками систем управления автономных малоразмерных БПЛА для снижения вычислительной нагрузки и повышения скорости обработки данных.

Ключевые слова: автономная навигация, корреляционные алгоритмы, беспилотные летательные аппараты, оптимизация

Ссылка для цитирования: Беляев П.Ю., Зикратов И.А. Исследование автономной навигации беспилотных летательных аппаратов на основе корреляционных методов сравнения изображений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 109–118. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-108-117. EDN:DXAVDQ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-109-118>

Research on Autonomous Navigation of Unmanned Aerial Vehicles Based on Correlation-Based Image Comparison Methods

 Pavel Yu. Belyaev , belyaev.edu@gmail.com

 Igor A. Zikratov, zikratov.ia@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. Autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) is one of the key challenges in the modern aerospace industry. Specifically, for small UAVs, the task of autonomous navigation becomes even more complex due to limitations in computational resources and sensor capabilities. Optimizing navigation methods under such conditions is a pressing issue that requires solutions capable of providing high performance with minimal resource consumption.

Objective. Improving the efficiency of autonomous navigation for small UAVs by using correlation methods for image comparison. Achieving this objective is linked to the development and evaluation of algorithms that provide high-speed and accurate navigation with limited computational resources. The work uses **methods** such as the autocorrelation function, Pearson correlation, the structural similarity index, and a simple neural network for image comparison.

Solution. The research showed that the autocorrelation-based approach demonstrates the best performance under low computational resources. It ensures high-speed processing of the entire image and shows optimal detection accuracy. Compared to other methods presented in the study, the autocorrelation approach is capable of working not only with noise in the "reference" map but also of using alternative areas with altered patterns as detected regions.

The scientific novelty of the study is determined by the systematic comparison of various methods applied to the task of image comparison for small UAVs with limited computational resources. Unlike well-known works in the field of correlation-extreme systems, this research focuses on the use of a "reference map" and a search area, representing two different images of the same terrain taken from different sources. This is a key difference, as most methods are not highly efficient in processing such images where patterns may differ significantly.

The practical significance of the developed algorithm lies in the fact that the proposed autocorrelation-based method can be used by developers of autonomous small UAV control systems to reduce computational load and increase data processing speed.

Keywords: autonomous navigation, correlation algorithms, unmanned aerial vehicles, optimization

For citation: Belyaev P.Yu., Zikratov I.A. Research on Autonomous Navigation of Unmanned Aerial Vehicles Based on Correlation-Based Image Comparison Methods. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):109–118. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-108-117. EDN:DXAVDQ

Введение

В условиях быстрого развития повсеместного использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) задача обеспечения надежной автономной навигации становится все более актуальной [1]. Особенно важной является эффективность алгоритмов анализа изображений, поскольку они играют ключевую роль в обеспечении навигационной информации. Однако существует проблема

прямой зависимости сложности алгоритма от автономного времени полета БПЛА, что особенно заметно на малогабаритных моделях с ограниченным временем полета. Подобные аппараты имеют малые вычислительные ресурсы и требуют оптимизированных алгоритмов обработки данных для выполнения задач в реальном времени. В связи с этим важность скорости алгоритмов становится одним из основных критериев при выборе мето-

дов анализа изображений. Методы, рассматриваемые в данной работе, были специально выбраны для работы с изображениями, поскольку они представляют основной источник информации для восприятия окружающей среды БПЛА. Анализируемые методы включают как классические алгоритмы обработки изображений, так и более современные подходы, основанные на глубоком обучении и нейронных сетях.

Анализ существующих работ

Развитие технологий спутниковой картографии Земли существенно улучшило качество разрешения визуальных карт для практически любой местности, даже при наличии различных особенностей рельефа или других условий. Этот прогресс активно способствует развитию области автономного позиционирования БПЛА. В настоящее время имеет значение способность определения географического положения на основе сопоставления изображений, зафиксированных оптическими системами БПЛА, с эталонным изображением со спутника.

Так, в работах [2, 3] рассматриваются методы на основе автокорреляции и корреляции Пирсона для выявления схожих структур изображения. Таким подходам обусловлено хорошее быстродействие, однако существует проблема с оптимизацией информации, хранимой непосредственно на БПЛА.

Более рациональными для хранения информации служат методы на основе нейронных сетей [4–6], где основные паттерны местности накапливаются в заранее обученной модели, что позволяет воспроизводить и дополнять исходные данные на этапе дообучения. Однако данные методы обладают довольно сильной зависимостью от установленного на БПЛА вычислителя, что негативно сказывается на времени полета. Такие методы наиболее перспективны на больших БПЛА, способных переносить дополнительные аккумуляторы и более развитые вычислители (например, NVIDIA Xavier, обладающие CUDA-ядрами для оптимизации многопоточного вычисления на GPU).

Также стоит отметить методы на основе одновременной локализации и построения карты (SLAM, *аббр. от англ. Simultaneous Localization And Mapping*) [7], которые также повсеместно используются в задаче автономной навигации. Так, в качестве детектора точек обнаружения выступает метод SURF (*аббр. от англ. Speeded Up Robust Features*) [8], метод масштабно-инвариантной трансформации признаков (SIFT, *аббр. от англ. Scale-Invariant Feature Transform*) [9], а также их модификации [10–12]. Данные методы эффективны при облете исследуемой местности многократно, однако на практике вся сложность упирается как в размеры местности, так и в количество обле-

тов для повышения точности, что позволяет решать более узкие задачи навигации БПЛА.

Также в задаче автономной навигации существуют схожие по своей направленности с методом SLAM, однако в качестве дескриптора точки используются физические аппаратные комплексы, такие как Lidar [13, 14] и радарные устройства [15, 16]. В задаче автономной навигации данные методы перспективны в плане выявления препятствий в режиме реального времени или составлении локальной карты автономных робототехнических комплексов.

На основе анализа существующих решений стоит отметить, что большинство классических исследований направлено на решение задачи, когда обнаруживаемая область является зашумленной копией исследуемой области. Такая модель обнаружения изображений не всегда является адекватной реальным условиям наблюдения. Принципиальной особенностью данной работы является иная постановка задачи. А именно: обнаруживаемый и эталонный участок – это снимки одной и той же местности, выполненные в разное время (суток, года) различными устройствами. Анализ подобных снимков из разных источников показал, что сцены в этом случае могут иметь отличия, например, на изображениях появляются (или пропадают) паттерны (строения, дороги, контуры лесных массивов и т. п.).

В статье в качестве меры точности совмещения двух изображений использовался простейший алгоритм, основанный на вычислении удаления геометрического центра «скользящего» окна от среднего положения точек соответствия, полученных в результате анализа пикселей изображения.

Вместе с тем авторы отдают себе отчет, что задача оценивания точности совмещения изображений является краеугольной задачей навигации. В данной работе проведено сравнение алгоритмов, основанных на простых математических методах. В отличие от более сложных подходов такие алгоритмы способны повысить эффективность автономного полета БПЛА с минимальными потерями точности. Это позволяет расширить сферу применения БПЛА при использовании как больших, так и малых групп, вместо более объемных аналогов в меньшем количестве.

Используемые методы

В качестве исследуемых были выделены корреляционные алгоритмы (автокорреляция, корреляция Пирсона), метод на основе индекса структурного сходства изображений (SSIM, *аббр. от англ. Structure Similarity*), а также метод на основе сверточных нейронных сетей.

При сравнении двух разных изображений автокорреляция может использоваться для измерения сходства между ними. В этом контексте автокорреляция позволяет оценить степень, с которой одно изображение похоже на другое при различных сдвигах.

Формула автокорреляции для сравнения двух разных изображений выглядит следующим образом:

$$R(k) = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где n – общее количество пикселей в изображении; x_i – среднее значение яркости всех пикселей изображения X ; y_{i+k} – яркость пиксела изображения Y на позиции, сдвинутой относительно X на k позиций; $\bar{y}$ – среднее значение яркости всех пикселей изображения.

Метод на основе корреляции Пирсона измеряет степень линейной зависимости между двумя переменными. В контексте сравнения двух разных изображений этот метод может использоваться для оценки степени сходства между значениями яркости пикселей этих изображений:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где y_i – яркость пиксела изображения Y .

Метод SSIM оценивает структурное сходство между двумя изображениями, учитывая их восприятие человеческим зрением [17].

Формула SSIM состоит из трех компонентов – яркость, контрастность и структура:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (3)$$

где μ_x и μ_y – средние значения яркости пикселей; σ_x и σ_y – стандартные отклонения яркости пикселей; σ_{xy} – ковариация между яркостями пикселей; C_1 и C_2 – константы, используемые для стабилизации деления на ноль в случае, если дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 близки к нулю.

В качестве нейронной сети была выбрана простая модель на основе ResNet18 [18]. Архитектура нейронной сети включает два линейных слоя, применяемых последовательно с нелинейной функцией активации ReLU. В конечной части нейронной сети для преобразования выходных значений в диапазон $[-1; 1]$ была выбрана гиперболическая функция тангенса. Этот выбор обусловлен требованием представить оценку сходства между изображениями в виде числовой оценки в указанном диапазоне. Полное сравнение методов представлено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение исследуемых методов

TABLE 1. Comparison of the Analyzed Methods

Метод	Вычислительная сложность	Преимущества	Недостатки
Автокорреляция	Низкая	Простота реализации, низкие требования к вычислительным ресурсам	Чувствительность к шумам и изменениям в окружающей среде, ограничения в точности на изображениях высокого разрешения
Корреляция Пирсона	Низкая	Простота реализации, устойчивость к некоторым видам шумов	Ограничения в точности при сильных искажениях изображений, неэффективен для динамических сцен
SSIM	Средняя	Устойчивость к шумам, хорошая точность в динамических сценах	Требуется предварительная обработка изображений, более высокие вычислительные затраты по сравнению с простыми методами
На основе нейронных сетей	Высокая	Способность к обучению на больших объемах данных, высокая точность на сложных сценах	Требуется большое количество вычислительных ресурсов, высокая вычислительная сложность, неэффективен при недостаточном количестве обучающих данных

Метод «скользящего» окна для обхода карты

Метод «скользящего» окна является важным инструментом анализа для решения различных задач в области обработки изображений, геоинформационных систем и машинного зрения. Его применимость охватывает широкий спектр задач, включая обнаружение объектов, сегментацию изображений, анализ текстур и многие другие. В контексте обхода карты метод «скользящего» окна позволяет систематически исследовать содер-

жимое карты, разбивая ее на более мелкие участки и анализируя их поочередно. Этот подход особенно полезен при работе с крупномасштабными картами, когда анализировать карту целиком становится неэффективно.

Существует несколько вариантов обхода карты с помощью метода «скользящего» окна.

Вариант 1. Метод полного обхода предполагает перемещение окна по всей карте без перекрытия. Окно начинает свое движение с одного угла карты

и последовательно просматривает все пиксели без пересечения с соседними окнами.

Вариант 2. В случае метода обход с перекрытием окна перемещается с заданным шагом по горизонтали и вертикали, но при этом имеется перекрытие между соседними окнами. Такой подход позволяет более полно охватить карту и учитывать контекст окружения при анализе. Формулы для расчета количества шагов остаются теми же, но шаги должны быть выбраны с учетом перекрытия.

Вариант 3. При случайном обходе окно перемещается по карте с помощью случайных сдвигов по горизонтали и вертикали. Этот метод может быть полезен для изучения случайных областей карты или для создания случайной выборки для анализа.

Вариант 4. При обходе по спирали окно перемещается, начиная с центра карты, и движется вдоль спирали до достижения края карты, затем увеличивает радиус спирали и продолжает движение до тех пор, пока не охватит всю карту. Этот метод может быть полезен для анализа концентрических областей карты.

Сравнение методов обхода представлено в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение методов обхода

TABLE 2. Comparison of Traversal Methods

Метод	Преимущества	Недостатки
Полный обход	Прост в реализации, подходит для быстрой оценки	Может быть неэффективен при больших размерах карты
Обход с перекрытием	Более полный анализ, учет контекста окружения	Требует дополнительной обработки результатов
Случайный обход	Позволяет изучать случайные области карты	Результаты могут быть менее систематическими
Обход по спирали	Эффективен для анализа концентрических областей карты	Сложнее в реализации, требует дополнительных вычислений

Оценка быстродействия алгоритмов

Для оценки быстродействия исследуемых подходов были произведены замеры зависимости скорости работы метода в зависимости от алгоритма (рисунок 1). Для расчета использовался процессор Intel(R) Core(TM) i7-9700KF CPU@3.60GHz на простых алгоритмах. В случае вычисления для метода на основе нейронных сетей также применялся процессор с учетом того, что при использовании малогабаритных дронов нет возможности установить на них вычислительную машину с CUDA ядрами, хотя в таком случае скорость работы алгоритма значительно возросла. В случае с обходом с перекрытием параметром перекрытия служило значение 0,75. Наибольшая

скорость свойственна более простым методам, однако при прямом обходе без перекрытия возможна ситуация, когда искомая область не попадает в нужный объем, из-за чего возможен пропуск искомой области.

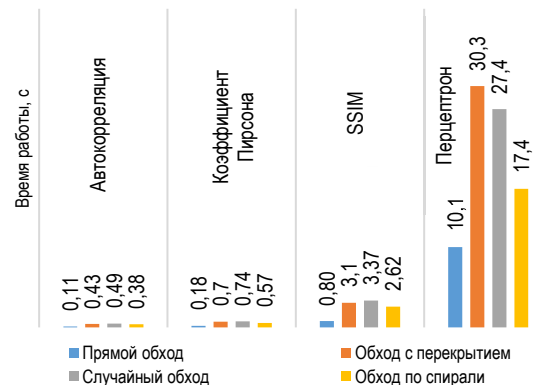


Рис. 1. Сравнение скорости работы методов обхода окна

Fig. 1. Comparison of the Processing Speed of Window Traversal Methods

Для предотвращения проблем с пропуском области был детальнее рассмотрен метод обхода с перекрытием. С повышением коэффициента перекрытия заметно вырастает вычислительная сложность, но при его правильном подборе это позволяет повысить надежность работы алгоритма. Сравнение различных коэффициентов представлено на рисунке 2.

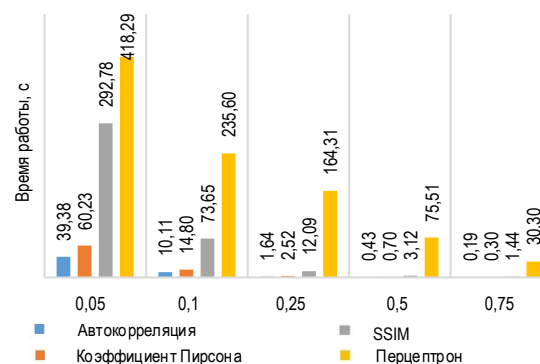


Рис. 2. Сравнение скорости работы методов обхода окна с перекрытием при различных коэффициентах

Fig. 2. Comparison of Speed of Overlapping Window Traversal Methods at Different Coefficients

При условии, что решается задача схожести изображений, а не поиска объекта, наиболее подходящим является метод обхода с перекрытием ввиду его оптимальности для поставленной задачи. Если рассматривать применимость остальных способов, то обход по спирали и случайный обход перспективны, если используются надежные алгоритмы совместно с определенным порогом активации, когда высокое значение поиска прерывает выполнение программы. Такой подход повышает эффективность выполнения задачи, однако не лишен недостатков.

Вычислительная сложность алгоритмов в значительной степени влияет на решение задачи в работе БПЛА. Подход на основе нейронных сетей на один кадр требует от 30 до 418 с (см. рисунок 1), что делает невозможным решение поставленной задачи в режиме реального времени. Более простые алгоритмы, напротив, показывают приемлемые для решения задачи расчеты по времени, если брать показатель перекрытия от 0,25 до 0,75.

Сравнение методов

Для сравнения точности работы описанных подходов было произведено иммитационное моделирование на данных, взятых из открытых источников. В качестве карты местности была выбрана область на юге г. Санкт-Петербург, так как данная область обладает большим количеством паттернов. Импорт эталонной местности осуществлялся с сервиса Google Earth Pro. Размер области в реальном масштабе составил $\sim 15 \times 9$ км, при этом в пиксельном эквиваленте размер карты

составляет 8192×4801 пикселей (рисунок 3). При моделировании работы алгоритмов карта используется в качестве «эталона» и закладывается в оперативную память БПЛА.

В эксперименте для каждого окна обхода выделяется область 700×700 пикселей, так как в данном масштабе это соизмеримо с полетом БПЛА на высоте 3 км. Затем на полученном участке изображения производится сравнение с эталонным изображением и подсчет степени их схожести. Степень схожести изображений представляется в диапазоне $[-1; 1]$, где 1 – полная схожесть, 0 – отсутствие схожести, а -1 – отрицательная схожесть, где пиксели одного изображения имеют полностью обратные значения пикселей другого изображения. Пример эталонного изображения представлен на рисунке 4: выделенная область из эталонной карты (область А), искомая область, полученная из сервиса Яндекс.Карты (область В), а также искаженная и затемненная область из эталонной карты (область С).

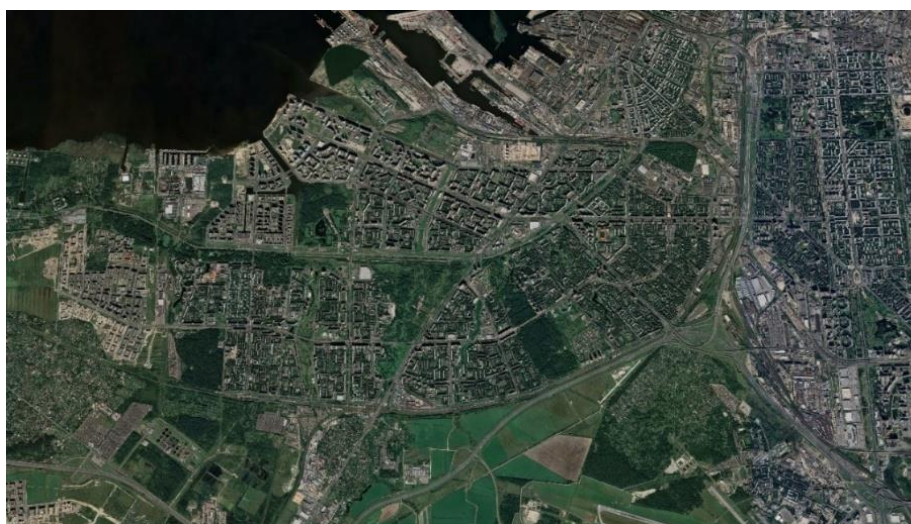


Рис. 3. Эталонная карта местности

Fig. 3. Reference Map of the Area

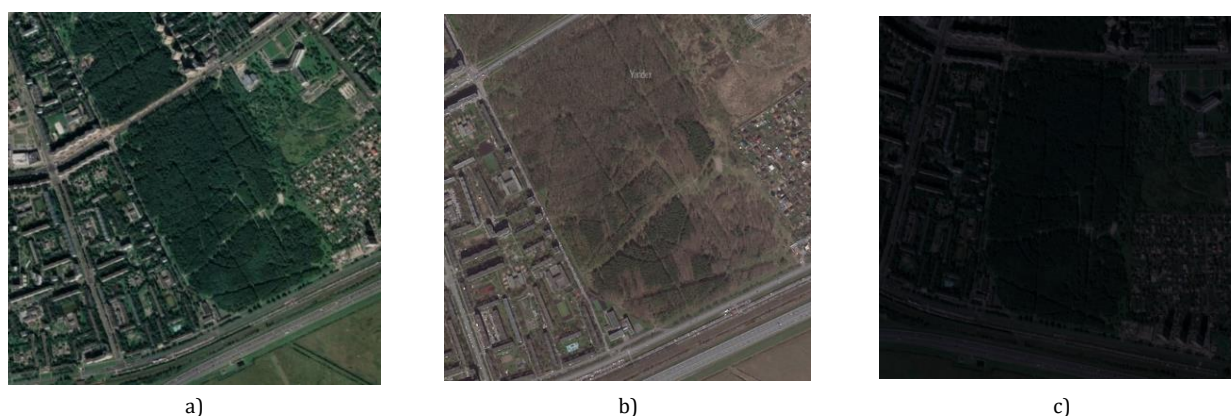


Рис. 4. Искомая область: а) оригинальный снимок; б) область с альтернативной карты; в) затемненная и искаженная область

Fig. 4. The Searched Area: a) Original Image; b) Area from the Alternative Map; c) Darkened and Distorted Area

Оценка точности алгоритмов

Для каждой искомой области были проведены эксперименты на оригинальной карте с различным размером региона интереса (ROI, *аббр. от англ. Region of Interest*). Для получения оптимальных значений шаг обхода обрамляющего окна составлял 10 пикселей. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Наивысшую точность показал подход на основе нейронной сети, однако, как говорилось ранее, данный метод обладает довольно медленной скоростью работы, что негативно повлияет на время полета малолетного БПЛА. Также алгоритм на основе автокорреляционного подхода показал хорошие результаты с эффективным временем работы. Заметно влияние коэффициента ROI на результаты работы алгоритмов, что говорит о том, что при реализации данного подхода необходимо учитывать высоту полета и относительный масштаб исследуемой области для повышения точности навигации. Под значением точности представлено наивысшее значение в сходимости изображений.

Более подробно рассмотрим результат работы алгоритмов непосредственно на изображении. На рисунке 5 представлены три различные ситуации, когда дрон получает изображение с камеры. На рисунке 5а использован паттерн, схожий с эталонной картой, на рисунке 5b взят тот же участок местности с сервиса Яндекс.Карты, снятый в осенний период времени, и участок на рисунке 5с представляет собой обработанное изображение рисунка 5а (поворот и затемнение) для имитации темного времени суток.

«Скользкое» окно перемещалось по эталонной карте через каждые 200 пикселей, обрамляющее окно составляло 700×700 пикселей. Из результатов расчета следует, что алгоритмы, требующие меньшего количества ресурсов конечного устройства, способны выдавать приемлемые показатели по скорости и точности в рамках поставленной задачи. На практике это дает возможность распределять ресурсы БПЛА наиболее эффективно, что позволяет как повышать энергоэффективность автономного дрона, так и закладывать свободные ресурсы на выполнение дополнительных задач на БПЛА в процессе выполнения полета.

ТАБЛИЦА 3. Результаты работы алгоритмов

TABLE 3. Results of Algorithms Performance

Метод	Коэффициент корреляции								
	Область А			Область В			Область С		
	Коэффициент ROI								
	0,5	0,75	1,0	0,5	0,75	1,0	0,5	0,75	1,0
Автокорреляция	0,717	0,449	0,426	0,64	0,482	0,469	0,626	0,557	0,463
Корреляция Пирсона	0,260	0,190	0,277	0,253	0,252	0,220	0,377	0,284	0,268
SSIM	0,164	0,188	0,139	0,291	0,330	0,302	0,0753	0,113	0,137
На основе нейронных сетей	0,93	0,91	0,93	0,90	0,88	0,89	0,79	0,81	0,84

Заключение

В ходе исследования были проведены эксперименты с использованием различных методов анализа изображений для локации объектов наблюдения с беспилотного транспортного средства. Методы автокорреляции, корреляции Пирсона, SSIM и нейронных сетей имеют разную эффективность при локации объектов наблюдения. Методы на основе нейронных сетей демонстрируют наилучшие результаты среди всех рассмотренных, однако, при решении задачи оптимизации на малоразмерном БПЛА упор стоит делать на скорость работы алгоритма. Стоит отметить, что из простых методов наиболее успешным оказался предложенный метод на основе автокорреляционной функции с условием того, что в случае области В (см. рисунок 4b) была использована альтернатив-

ная карта с заметным отличием структурного паттерна изображения в сравнении с «эталоном», что позволяет сделать вывод об актуальности исследования данного метода для решения похожих задач. Такая постановка задачи отличается от известной, в которой обнаруживаемое изображение представляло собой аддитивную смесь копии эталонного и гауссового шума.

В настоящий момент производятся дальнейшие исследования по усовершенствованию корреляционных подходов в рамках перехода от непосредственно самих изображений к их частотным характеристикам, что позволит оптимизировать скорость работы алгоритма и повысить точность определения местоположения в режиме реального времени.

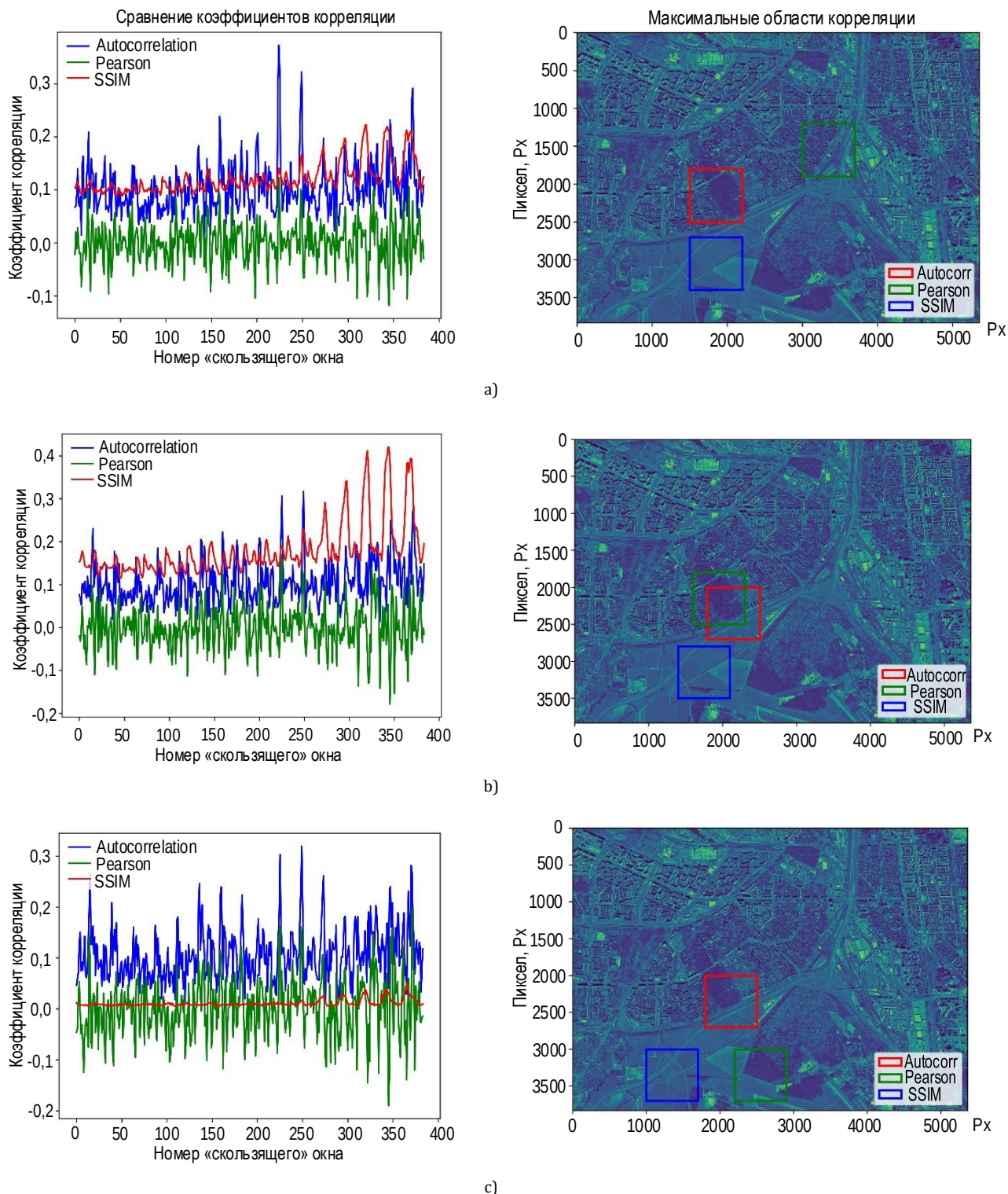


Рис. 5. Результаты вычисления коэффициента корреляции при обходе «скользящего» окна по изображению (слева) и результат работы алгоритма (справа) для оригинального снимка (а), области с альтернативной карты (б) и затемненной и искаженной области (в)

Fig. 5. Results of the Correlation Coefficient Calculation When Traversing the "Sliding" Window Over the Image (Left) and the Algorithm Result (Right) for the Original Image (a), the Area from the Alternative Map (b) and the Darkened and Distorted Area (c)

Список источников

1. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 4. С. 13–23. EDN:YLNEPH
2. Sozzi M., Kayad A., Marinello F., Taylor J., Tisseyre B. Comparing vineyard imagery acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platform // *Oeno One*. 2020. Vol. 54. Iss. 2. PP. 189–197. DOI:10.20870/oeno-one.2020.54.1.2557
3. Pastonchi L., Di Gennaro S.F., Toscano P., Matese A. Comparison between satellite and ground data with UAV-based information to analyse vineyard spatio-temporal variability // *Oeno One*. 2020. Vol. 54. Iss. 4. PP. 919–934. DOI:10.20870/oeno-one.2020.54.4.4028
4. Lu Z., Liu F., Lin X. Vision-based localization methods under GPS-denied conditions // *arXiv:2211.11988*. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2211.11988
5. Lu K., Xu R., Li J., Lv Y., Lin H., Liu Y. A Vision-Based Detection and Spatial Localization Scheme for Forest Fire Inspection from UAV // *Forests*. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 383. DOI:10.3390/f13030383
6. Nassar A., Amer K., ElHakim R., ElHelw M. A Deep CNN-Based Framework for Enhanced Aerial Imagery Registration with Applications to UAV Geolocalization // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPR, Salt Lake City, USA, 18–22 June 2018)*. 2018. PP. 1513–1523.
7. Zhang T., Liu C., Li J., Pang M., Wang M. A New Visual Inertial Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Algorithm Based on Point and Line Features // *Drones*. 2022. Vol. 6. Iss. 1. P. 23. DOI:10.3390/drones6010023
8. Cheng C., Wang X., Li X. UAV image matching based on surf feature and harris corner algorithm // *Proceedings of the 4th International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC, Shanghai, China, 5–6 June 2017)*. IET, 2017. DOI:10.1049/cp.2017.011
9. Zhao J., Zhang X., Gao C., Qiu X., Tian Y., Zhu Y., Cao W. Rapid Mosaicking of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images for Crop Growth Monitoring Using the SIFT Algorithm // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Iss. 10. P. 1226. DOI:10.3390/rs11101226
10. Jiang S., Jiang W., Guo B., Li L., Wang L. Learned Local Features for Structure from Motion of UAV Images: A Comparative Evaluation // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021. Vol. 14. PP. 10583–10597. DOI:10.1109/JSTARS.2021.3119990
11. Fan J., Yang X., Lu R., Li W., Huang Y. Long-term visual tracking algorithm for UAVs based on kernel correlation filtering and SURF features // *The Visual Computer*. 2023. Vol. 39. PP. 319–333. DOI:10.1007/s00371-021-02331-y
12. Tsai C. H., Lin Y. C. An accelerated image matching technique for UAV orthoimage registration // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 128. PP. 130–145. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.03.017
13. Lee K.W., Park J.K. Comparison of UAV Image and UAV LiDAR for Construction of 3D Geospatial Information // *Sensors & Materials*. 2019. Vol. 31. Iss. 10. PP. 3327–3334. DOI:10.18494/SAM.2019.2466
14. Lin Y. C., Cheng Y.T., Zhou T., Ravi R., Hasheminasab S.M., Flatt J.E., et al. Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Iss. 24. P. 2893. DOI:10.3390/rs11242893
15. Bandini F., Sunding T.P., Linde J., Smith O., Jensen I.K., Köppl C.J., Butts M., Bauer-Gottwein P. Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 237. P. 111487. DOI:10.1016/j.rse.2019.111487
16. Ezuma M., Anjinappa C.K., Semkin V., Guvenc I. Comparative Analysis of Radar Cross Section Based UAV Classification Techniques // *arXiv:2112.09774*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2112.09774
17. Palubinskas G. Image similarity/distance measures: what is really behind MSE and SSIM? // *International Journal of Image and Data Fusion*. 2017. Vol. 8. Iss. 1. PP. 32–53. DOI:10.1080/19479832.2016.1273259
18. Ullah A., Elahi H., Sun Z., Khatoon A., Ahmad I. Comparative Analysis of AlexNet, ResNet18 and SqueezeNet with Diverse Modification and Arduous Implementation // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47. PP. 2397–2417. DOI:10.1007/s13369-021-06182-6

References

1. Bondarev A., Kirichek R. Overview of Unmanned Aerial Apparatus for General Use and Regulation of Air UAV Movement in Different Countries. *Telecom IT*. 2016;4(4):13–23. EDN:YLNEPH
2. Sozzi M., Kayad A., Marinello F., Taylor J., Tisseyre B. Comparing vineyard imagery acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platform. *Oeno One*. 2020;54(2):189–197. DOI:10.20870/oeno-one.2020.54.1.2557
3. Pastonchi L., Di Gennaro S.F., Toscano P., Matese A. Comparison between satellite and ground data with UAV-based information to analyse vineyard spatio-temporal variability. *Oeno One*. 2020;54(4):919–934. DOI:10.20870/oeno-one.2020.54.4.4028
4. Lu Z., Liu F., Lin X. Vision-based localization methods under GPS-denied conditions. *arXiv:2211.11988*. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2211.11988
5. Lu K., Xu R., Li J., Lv Y., Lin H., Liu Y. A Vision-Based Detection and Spatial Localization Scheme for Forest Fire Inspection from UAV. *Forests*. 2022;13(3):383. DOI:10.3390/f13030383
6. Nassar A., Amer K., ElHakim R., ElHelw M. A Deep CNN-Based Framework for Enhanced Aerial Imagery Registration with Applications to UAV Geolocalization. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR, 18–22 June 2018, Salt Lake City, USA*. 2018. p.1513–1523.
7. Zhang T., Liu C., Li J., Pang M., Wang M. A New Visual Inertial Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Algorithm Based on Point and Line Features. *Drones*. 2022;6(1):23. DOI:10.3390/drones6010023
8. Cheng C., Wang X., Li X. UAV image matching based on surf feature and harris corner algorithm. *Proceedings of the 4th*

International Conference on Smart and Sustainable City, ICSSC, 5–6 June 2017, Shanghai, China. IET; 2017. DOI:10.1049/cp.2017.011

9. Zhao J., Zhang X., Gao C., Qiu X., Tian Y., Zhu Y., Cao W. Rapid Mosaicking of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images for Crop Growth Monitoring Using the SIFT Algorithm. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1226. DOI:10.3390/rs11101226

10. Jiang S., Jiang W., Guo B., Li L., Wang L. Learned Local Features for Structure from Motion of UAV Images: A Comparative Evaluation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021;14:10583–10597. DOI:10.1109/JSTARS.2021.3119990

11. Fan J., Yang X., Lu R., Li W., Huang Y. Long-term visual tracking algorithm for UAVs based on kernel correlation filtering and SURF features. *The Visual Computer*. 2023;39:319–333. DOI:10.1007/s00371-021-02331-y

12. Tsai C. H., Lin Y. C. An accelerated image matching technique for UAV orthoimage registration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017;128:130–145. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.03.017

13. Lee K.W., Park J.K. Comparison of UAV Image and UAV LiDAR for Construction of 3D Geospatial Information. *Sensors & Materials*. 2019;31(10):3327–3334. DOI:10.18494/SAM.2019.2466

14. Lin Y. C., Cheng Y.T., Zhou T., Ravi R., Hasheminasab S.M., Flatt J.E., et al. Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments. *Remote Sensing*. 2019;11(24):2893. DOI:10.3390/rs11242893

15. Bandini F., Sunding T.P., Linde J., Smith O., Jensen I.K., Köppl C.J., Butts M., Bauer-Gottwein P. Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques. *Remote Sensing of Environment*. 2020;237:111487. DOI:10.1016/j.rse.2019.111487

16. Ezuma M., Anjinappa C.K., Semkin V., Guvenc I. Comparative Analysis of Radar Cross Section Based UAV Classification Techniques. *arXiv:2112.09774*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2112.09774

17. Palubinskas G. Image similarity/distance measures: what is really behind MSE and SSIM? *International Journal of Image and Data Fusion*. 2017;8(1):32–53. DOI:10.1080/19479832.2016.1273259

18. Ullah A., Elahi H., Sun Z., Khatoon A., Ahmad I. Comparative Analysis of AlexNet, ResNet18 and SqueezeNet with Diverse Modification and Arduous Implementation. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022;47:2397–2417. DOI:10.1007/s13369-021-06182-6

Статья поступила в редакцию 05.05.2024; одобрена после рецензирования 20.09.2024; принята к публикации 18.10.2024.

The article was submitted 05.05.2024; approved after reviewing 20.09.2024; accepted for publication 18.10.2024.

Информация об авторах:

БЕЛЯЕВ
Павел Юрьевич

аспирант кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-5387-0622>

ЗИКРАТОВ
Игорь Алексеевич

доктор технических наук, декан факультета кибербезопасности, профессор кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9054-800X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.41

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-119-129>

Исследование распределения константных значений в исходном коде программ на языке C

✉ Константин Евгеньевич Израилов, konstantin.izrailov@mail.ru

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время ключевую роль в разработке программного обеспечения играет программная инженерия, одним из критерия развитости которой является изучение ее фактологии и различных научно-практических закономерностей. Важным аспектом данной области является логика выполнения программ, оперирующая внутренними данными, и, в частности – константными значениями, выявление закономерностей в которых и актуализирует данное исследование. В качестве основных применений данной закономерности можно отметить такие, как получение фундаментальных знаний об алгоритмах, создание новых и расширение существующих метрик оценки и сравнения программного кода, развитие методов его оптимизации, применение в генетическом программировании и др.

Целью настоящей статьи получение частотного распределения константных значений в исходном коде программ на языке программирования C.

Сущность представленного подхода заключается в создании метода статистического анализа текста исходных кодов программ, содержащихся в датасете EkeBench (который состоит из огромного количества исходного кода функций на языке программирования C, их ассемблерного кода для различных процессорных архитектур, ошибок компиляции и другой информации).

Предложенный метод **базируется** на применении алгоритмов лексического и синтаксического разбора функций исходного кода, семантического определения типов констант, преобразования записи символов языка программирования в соответствующие числовые или строковые значения.

Метод **имеет реализацию** в виде программного средства на языке программирования Python, приведенного в виде интуитивно понятного псевдокода.

Эксперименты с применением данного прототипа позволили получить искомое распределение константных значений для исходного кода программ на языке программирования C. **Анализ** полученных результатов позволил сделать ряд важных теоретико-практических выводов касательно наиболее часто используемых констант, соответствия полученного распределения закону Ципфа и близость к показательной функции, аномального появления ряда констант в Top-50 и др.

Научная новизна предложенного подхода заключается в том, что распределение константных значений для исходного кода программ на языке программирования C получено впервые.

Теоретическая значимость состоит в получении новых фундаментальных знаний касательно особенностей и закономерностей конструкций исходного кода, которые могут быть расширены и на другие языки программирования.

Практическая значимость заключается в применении распределения для большого спектра задач, включая авторский генетический реверс-инжиниринг, который сам по себе является качественно новым направлением.

Ключевые слова: исходный код, константные значения, распределение, метод, прототип, эксперимент, генетический реверс-инжиниринг

Ссылка для цитирования: Израилов К.Е. Исследование распределения константных значений в исходном коде программ на языке C // Труды учебных заведений связи. 2024. Т.10. №5. С. 119–129. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-118-128. EDN:KARAVM

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-119-129>

Constant Values Distribution Investigation in the C Programs Source Code

 Konstantin E. Izrailov, konstantin.izrailov@mail.ru

Saint-Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Annotation

Currently, software engineering plays a key role in software development, one of the criteria for the development of which is the investigation of its factology and various scientific and practical patterns. An important aspect of this area is the logic of program execution, operating with internal data, and, in particular, constant values, the identification of patterns in which actualizes this research. The main applications of this pattern include obtaining fundamental knowledge about algorithms, creating new and expanding existing metrics for evaluating and comparing program code, developing methods for its optimization, using it in genetic programming, etc.

The **purpose** of this article is to obtain the frequency distribution of constant values in the source code of programs in the C programming language.

The **essence** of the presented approach is to create a method for statistical analysis of the text of the source codes of programs contained in the ExeBench dataset (which consists of a huge amount of source code of functions in the C programming language, their assembler code for various processor architectures, compilation errors and other information).

The proposed method is **based** on the use of algorithms for lexical and syntactic analysis of source code functions, semantic definition of constant types, and conversion of the recording of programming language symbols into the corresponding numeric or string values.

The method **has an implementation** in the form of a software tool in the Python programming language, given in the form of an intuitive pseudocode. **Experiments** using this prototype allowed us to obtain the desired distribution of constant values for the source code of programs in the C programming language. **Analysis** of the obtained results allowed us to make a number of important theoretical and practical conclusions regarding the most frequently used constants, the correspondence of the obtained distribution to the Zipf law and its proximity to the exponential function, the anomalous appearance of a number of constants in the Top 50, etc.

The **scientific novelty** of the proposed approach lies in the fact that the distribution of constant values for the source code of programs in the C programming language is obtained for the first time.

The **theoretical significance** consists in obtaining new fundamental knowledge regarding the features and patterns of source code constructions, which can be extended to other programming languages.

The **practical significance** consists in applying the distribution to a wide range of tasks, including the author's genetic reverse engineering, which in itself is a qualitatively new direction.

Keywords: source code, constant values, distribution, method, prototype, experiment, genetic reverse engineering

For citation: Izrailov K.E. Constant Values Distribution Investigation in the C Programs Source Code. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):119–129. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-118-128. EDN:KARAVM

Введение

Центральным звеном информационных технологий, обеспечивающих функционирование практически всех сфер общества, является программное обеспечение (далее – ПО), логика работы которого в преобладающем большинстве случаев

задается исходным кодом (далее – ИК), создаваемом на некотором языке программирования. Для качественного улучшения самого ПО и процесса его разработки была сформирована область программной инженерии, требующая не только практического применения, но и изучение существующих

щих в ней фактов, законов и других научных аспектов. Это позволит как повышать эффективность разрабатываемых программ (например, создавая высокопроизводительные алгоритмы), так и обеспечивать их безопасность (например, выявляя критичные ошибки в коде).

Исходя из достаточно продолжительной истории разработки программ (одни из первых языков Fortran и Алгол были созданы еще в 60-х годах прошлого столетия [1]), а также из многообразия парадигм программирования и огромного количества выпущенного ПО, сформировался некоторый пул связанных с ними знаний. Так, существует подобласть, направленная на предотвращение угроз безопасности информации, в рамках которой созданы базы сигнатур наиболее известных уязвимостей ИК и машинного кода (далее – МК). В рамках теории создания компиляторов созданы специализированные представления как самих языков программирования: например, форма Бэкуса – Наура, так и программ: дерево абстрактного синтаксиса (далее – ДАС). Адаптация искусственного интеллекта в части эволюционных алгоритмов позволила развить область генетического программирования для автоматического создания программы путем их итеративного улучшения согласно заданным критериям. Все эти подобласти так или иначе оперируют определенной логикой выполнения программ, важной частью которой являются внутренние данные, и, в частности – константные значения. В ином случае (т. е. если бы константы в ИК отсутствовали, как класс) любая сложная программа была бы крайне абстрактной (с позиции логики своего выполнения) или должна была настраиваться внешними параметрами, что снизило бы удобство ее использования до неприемлемого уровня; впрочем, стоит отметить, что в случае небольших задач использование константных значений не является необходимым, например, для функции нахождения максимального из нескольких чисел.

Исходя из вышесказанного, изучение фактов и законов применения константных значений в ИК является актуальным в рамках программной инженерии. А поскольку одним из наиболее популярных является язык С, позволяющий создавать программы для широкого спектра устройств – стационарных, мобильных, встроенных и т. п., то в рамках исследования будет использоваться именно он. Задача текущего исследования (далее – Задача) была сформулирована следующим образом: «Требуется получить частотное распределение константных значений в исходном коде программ на языке программирования С».

Применение распределения константных значений

Для обоснования значимости будущего результата исследования приведем некоторые из возможных применений распределения константных значений (далее – РКЗ).

Фундаментальные знания

Само по себе РКЗ расширяет область знаний о параметрах алгоритмов на языках программирования, применяемых для решения большого круга задач. Так, уже сейчас очевидно, что для программ, алгоритмы которых построены на логических операторах, наиболее частыми константами должны быть 1 и 0, соответствующие булевским значениям «Истина» (аналог на англ. – «True») и «Ложь» (аналог на англ. – «False»); а для нечеткой логики может добавиться третья константа – «-1».

Метрики кода

Частотное РКЗ для отдельно взятой программы может служить ее некоторой метрикой (по аналогии с другими [2]), а в ряде случаев – и «цифровым портретом», поскольку отражает специфику реализованных алгоритмов. Как результат, распределение можно использовать для частичной классификации программ по различным типам, а также для их сравнения (например, с целью нахождения дубликатов). Естественно, РКЗ будет не основным способом получения и сравнения метрик, а одним из дополнительных инструментов.

Оптимизация кода

Понимание наиболее «популярных» констант в программах позволит частично оптимизировать их выполнение, например, адаптацией процессорных команд под работу с именно этими значениями; например, для сравнения переменных с числом «0» (в противовес сравнению с произвольным числом) в большинстве процессоров существует отдельная инструкция.

Генетическое программирование

Суть генетического программирования заключается в автоматическом создании программ для решения целевой задачи за счет применения генетических алгоритмов (далее – ГА) [3]. В процессе генетического программирования создается большое количество экземпляров ИК, который итеративно приближается к искомому, решающему целевую задачу. Основными операциями ГА являются скрещивание и мутация; первая «смешивает» экземпляры двух промежуточных программ, а вторая – изменяет случайные конструкции в них. Как результат, знания о константных значениях, наиболее часто используемых в программах, позволят ускорить процесс генетического программирования путем более быстрой генерации подходящего ИК.

Генетический реинжиниринг машинного кода

Ответвлением от генетического программирования можно считать авторское направление, заключающееся в проведении реверс-инжиниринга МК для получения его ИК с применением ГА – названное *генетической дезволюцией* или *реинжинирингом* (в случае дальнейшего получения из ИК его алгоритмов, архитектуры, концептуальной модели и т. д.) [4]. В этом случае решается обратная оптимизационная задача эволюционного подбора такого ИК, который бы в точности компилировался в заданный МК. Очевидно, что перебор всех возможных константных значений будет крайне неэффективным, что потребует информации об их наиболее часто применяемых вариантах (например, чисел 0, 1, -1, 255 и пр.). В этом случае использование РКЗ в ИК существенно снизит рабочее время генетического реинжиниринга (далее – ГРИ).

Отметим, что именно необходимость в развитии последнего и послужила основной предпосылкой к постановке указанной Задачи, решение которой приводится далее в статье.

Обзор релевантных работ

Как показал анализ публикаций, в общедоступном информационном научном пространстве отсутствуют ссылки на какие-либо исследования, непосредственно посвященные решению Задачи, что может обосновываться ее некоторой узостью и специфичностью. Поэтому, далее проведем краткий обзор работ, в которых в принципе упоминаются распределения, устанавливающие какие-либо закономерности для ИК и МК программ.

Машинный код для процессоров

В авторском исследовании, частично опубликованном в работе [5], устанавливается взаимосвязь частотного распределения байтового представления инструкций МК с его семейством процессоров. Сравнение такого распределения для некоторой программы с заранее вычисленными и известными «цифровыми портретами» (за счет применения машинного обучения в части классификации) позволяет с большой долей вероятности определять тип процессора, на котором программа выполняется. Похожим образом в работе [6] предлагается оценивать принадлежность файлов к следующим классам: выполняемые (т. е. МК), скриптовые (т. е. ИК), текстовые (т. е. частично ИК) и бинарные (т. е. данные).

Размер машинного и исходного кодов

Также в авторском исследовании [7] установлена взаимосвязь между размерами двух представлений программы – ее ИК на языке С и МК. Как результат, по имеющемуся МК можно предсказать размер ИК, близкого к тому, из которого была

скомпилирована программа. Данное частное исследование входит в более общее, проводимое в рамках развития ГРИ, и предназначено для прогнозирования длины хромосомы (основного объекта эволюции в ГА), что существенно ускоряет подбор искомого ИК.

Закон Ципфа

Закон Ципфа, описывающий эмпирическую зависимость распределения частотности слов естественных языков [8], может быть частично применен и к области программной инженерии в части распределения количества конструкций ИК или идентификаторов переменных в нем.

Статистические закономерности

Статистическая обработка метаинформации из баз уязвимостей (например, NVD) с ранжированием частоты упоминания ключевых слов в них может построить вероятностные связи между элементами информационных систем и угрозами информационной безопасности [9].

Графовые зависимости

Существует целый пул исследований [10–12], посвященных получению зависимостей (как для ИК, так и МК) между вызовами функций, переходами между инструкциями, вычислениями переменных и т. п. Данные зависимости, как правило, отражаются в виде соответствующих графов, а их частым применением является поиск уязвимостей в ПО.

Частота выполнения фрагментов кода

В интересах оптимизации программ, их распараллеливания, тестирования, профилирования и других подобных задач исследователи в [13] оценивают частоту выполнения линейных участков кода программы, представленной в виде графа потока управления.

Таким образом, существует достаточно ограниченный пул способов получения и сравнения различных внутри программных зависимостей, а частотное РКЗ позволит расширить его новым оценочным инструментарием.

Датасет ExeBench

Получение РКЗ полностью теоретическим способом, скорее всего, невозможно, по причине отсутствия детализированной систематизации всех возможных задач, решаемых с помощью программной инженерии, а также применяемых в них алгоритмов. Таким образом, данное распределение может быть вычислено статистически – путем анализа большого набора программ, разработанных на языке программирования С. Подходящим для этого датасетом может служить собранный в рамках проекта ExeBench [14], содержащий огромное количество С-функций, их ассемблерного кода,

ошибок компиляции и другой информации. Все метаданные о функциях в датасете представлены в формате JSON, пример которой приведен ниже (символы «...» использованы для компактности описания):

```
{
  "text":
  {
    "path": "chris-se/dietlibc-
packaging/libugly/asctime_r.c",
    "func_def": "static void num2str(char *c, int i)\n{\n
c[0] = i / 10 + '0';\n c[1] = i % 10 + '0';\n}",
    "func_head": "void num2str(char *c, inti)",
    "fname": "num2str",
    "asm":
    {
      "real_gcc_x86_00":
      {
        "pre_asm":
        ".t.file\t\"\"\n\t.text\n\t.type\tnum2str, @function\n",
        "func_asm": "...",
        "target":
        {
          "impl": "gcc",
          "bits": 64,
          "lang": "gas",
          "o": "0"
        }
      }
    },
    ...
  }
  ...
}
...
```

Так, в JSON-примере содержится метainформация о функции `num2str()` в виде следующих полей: путь к соответствующему файлу с ИК («path»), ее имя («fname»), сам ИК («funct_def»), сигнатура («funct_head»), результаты компиляции с различными настройками (раздел «asm» и компилятор «real_gcc» для «x86» с опцией без оптимизации «O0» с получением ассемблерного кода в «target») и др. Анализ функций датасета из проекта EkeBench позволит собрать информацию об используемых конструкциях языка программирования, выделить их необходимые типы (включая константы) и построить РКЗ.

Метод: шаги, прототип, эксперимент

Для построения РКЗ необходим анализ датасета с ИК нетривиальными алгоритмами, производящими лексический и синтаксический разбор ИК функций, семантическое определение типов констант, преобразование записи символов языка программирования в соответствующие числовые или строковые значения (например, ASCII-символ 'x' имеет значение 120) и др. Для объединения же алгоритмов в единый процесс выполнения с корректной связью их параметров и результатов работы требуется соответствующий метод построения РКЗ (далее – Метод), описание которого, а также его программной реализации в виде прототипа (далее – Прототип) приведено далее.

Метод состоит из 7 следующих основных *шагов*.

Шаг 1. Загрузка датасета ExeBench

На данном шаге описания функций, содержащиеся в датасете EхеBench, загружаются во внутреннее представление и подготавливаются для дальнейшей обработки. В частности, изначально отбрасываются функции, приводящие к ошибкам компиляции (т. е. не содержащие корректный ИК).

Шаг 2. Выделение тела функций

Из отобранных описаний функций выделяется ИК их тела; шаг является формальным, поскольку не содержит существенной логики.

Шаг 3. Токенизация ИК функций

Для каждого выделенного ИК применяется операция токенизации [15], которая преобразует его текст в ДАС. Последующий обход ДАС, а также учет синтаксических типов его узлов, позволяет получить список используемых констант.

Шаг 4. Предобработка констант

На данном шаге происходит обработка полученного списка констант и получение их реальных значений с учетом синтаксиса языка программирования С. Так, значения строковых констант остаются без изменений (например, «"abc"»), а символьные (например, «'x'») и десятичные (например, «123») константы преобразуются в числа; бинарные (начинающиеся с «0b»), восьмеричные (начинающиеся с «0o») и шестнадцатеричные (начинающиеся с «0x») константы также конвертируются в десятичные. Отдельным образом обрабатываются экранируемые символы, такие, как перевод строки («'\n'» с кодом 10), табуляции («'\t'» с кодом 9) и др.

Шаг 5. Сбор статистики

Собирается общая статистика появления константных значений в ИК по всем функциям, полученным из датасета ExeBench.

Шаг 6. Формирование таблицы с РКЗ

Используя статистику о появлении константных значений в ИК, на данном шаге строится итоговая таблица их распределения – от наиболее частых к наименее.

Шаг 7. Выполнение аппроксимации для РКЗ

Используя табличное представление РКЗ, в данном шаге вычисляется его закономерность; в простейшем случае для этого может использоваться функционал, встроенный в Microsoft Excel, отвечающий за построение трендов для гистограмм; однако более «правильным» будет применение специализированных (программных) инструментов. Также научное предвидение позволяет предположить, что аппроксимирующей функцией должна стать показательная.

Метод был реализован в виде соответствующего *Прототипа* на языке Python (версия 3.11). Для

этого, в частности, использовались следующие программные библиотеки:

- json для загрузки и разбора описаний функций из датасета ExeBench, хранящихся в файлах формата JSON;
- rusparser для парсинга ИК функций, построения ДАС, определения типов узлов, выделения констант и пр.;
- numpy, scipy.optimize для аппроксимации РКЗ к заданной функции [16];
- matplotlib.pyplot для построения графиков РКЗ и иных функций;
- datetime, os, glob, pathlib для вспомогательных целей (доступ к датасету, отладочный вывод, сохранение результатов работы шагов Метода в файл и пр.).

На момент написания статьи по Прототипу подана заявка на получение свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Псевдокод основного алгоритма Прототипа представлен на Листинге 1. Алгоритм на вход принимает путь к датасету ExeBench (через параметр «path»), содержащему JSON-файлы с описанием функций, а на выходе возвращает таблицу с РКЗ (*table*) и параметры аппроксимирующей показательной функции (*I*, *b* и *c*). И хотя псевдокод является интуитивно понятным, тем не менее, дадим краткие комментарии к его строкам.

Со строки 1 начинается реализация Шага 1, где создается пустой список для хранения записей датасета.

В строке 2 происходит загрузка датасета согласно заданному пути.

В строке 3 все записи датасета добавляются в созданную для хранения этого структуру.

Со строки 4 начинается реализация Шага 2, где создается пустой список для хранения описания функций.

В строке 5 начинается цикл по обходу сохраненных записей датасета.

В строке 6 достается описание функции из текущей записи датасета.

В строке 7 описание функции добавляется в созданную для хранения этого структуру.

В строке 8 заканчивается цикл, начатый в строке 5.

Со строки 9 начинается реализация Шага 3, где создается пустой список для хранения констант из ИК.

В строке 10 начинается цикл по обходу сохраненных описаний функций.

В строке 11 производится токенизация ИК тела текущей функции с получением списка его токенов.

Листинг 1. Алгоритм Прототипа

```

Input:
    path - путь к датасету ExeBench

Output:
    table - распределение константных значений (в виде таблицы)
    (a, b, c) - параметры формулы аппроксимации распределения константных значений

Begin
    // Шаг 1. Загрузка датасета ExeBench
    1: List<Record> records;
    2: dataset = LoadExeBench(path);
    3: records = dataset.Records();

    // Шаг 2. Выделение тела функций
    4: List<Function> functions;
    5: ForEach (rec In records) {
    6:     funct = GetFunction(record);
    7:     functions += funct;
    8: }

    // Шаг 3. Токенизация ИК функций
    9: List<Constant> constants;
    10: ForEach (funct In functions) {
    11:     toks = Tokenize(funct.Body)
    12:     ForEach (tok In toks) {
    13:         If (IsConstant(tok)) {
    14:             constants += tok.Value;
    15:         }
    16:     }
    17: }

    // Шаг 4. Предобработка констант
    18: ForEach (&const In constants) {
    19:     const = Preprocess(const);
    20: }

    // Шаг 5. Сбор статистики
    21: Dictionary<String, Integer> statistic;
    22: ForEach (cnst In constants) {
    23:     If (statistic.Has(cnst) == False) {
    24:         statistic[cnst] = 0;
    25:     }
    26:     statistic[cnst] += 1;
    27: }

    // Шаг 6. Формирование таблицы с РКЗ
    28: Table<2> table;
    29: ForEach ((value, count) In statistic.Items()) {
    30:     table.AddRow([value, count]);
    31: }

    // Шаг 7. Выполнение аппроксимации для РКЗ
    32: List<Integer> counts;
    33: counts = statistic.Values();

    34: Function<(x), (a, b, c)> funct;
    35: funct = { a * b ^ x + c }
    36: (a, b, c) = MakeApproximation(funct, counts)

    37: Return table, (a, b, c);
End

```

В строке 12 начинается цикл по обходу всех полученных токенов ИК функции.

В строке 13 проверяется, является ли текущий токен константой.

В строке 14, в случае успешности проверки в строке 13, значение токена-константы добавляется в созданную для хранения этого структуру.

В строке 15 заканчивается ветка условия, начатого в строке 13.

В строке 16 заканчивается цикл, начатый в строке 12.

В строке 17 заканчивается цикл, начатый в строке 10.

Со строки 18 начинается реализация Шага 4, где начинается цикл по обходу сохраненных констант; символ «&» означает, что текущий итератор цикла является ссылкой на элемент списка констант (а не копией) и, следовательно, его значение может быть изменено.

В строке 19 производится предобработка текущей константы с сохранением результата в их исходный список (через ссылку на объект-константу).

В строке 20 заканчивается цикл, начатый в строке 18.

Со строки 21 начинается реализация Шага 5, где создается пустой словарь для хранения статистики использования константных значений в ИК; ключами словаря являются значения константы (в строковой форме), а значениями словаря – целое число с общим количеством их вхождений.

В строке 22 начинается цикл по обходу сохраненных констант.

В строке 23 проверяется, отсутствует ли текущая константа в содержащем их словаре.

В строке 24, в случае успешности проверки в строке 23, текущая константа добавляется в словарь, а количество ее вхождений в ИК указывается равным 0.

В строке 25 заканчивается ветка условия, начатая в строке 23.

В строке 26 количество вхождений текущей константы ИК увеличивается на 1 (через инкрементацию значения в словаре по данному ключу).

В строке 27 заканчивается цикл, начатый в строке 22.

Со строки 28 начинается реализация Шага 6, где создается пустая таблица для хранения РКЗ с указанием количества столбцов, равных 2 (для хранения значения константы и количества ее вхождений, соответственно).

В строке 29 начинается цикл по обходу словаря со статистикой использования константных значений; итератором цикла является кортеж из пары «значение константы, количество вхождений».

В строке 30 в таблицу добавляется строка из двух элементов – значение константы и количество ее вхождений.

В строке 31 заканчивается цикл, начатый в строке 30.

Со строки 32 начинается реализация Шага 7, где создается пустой список для хранения всех вхождений констант, отсортированных по убыванию их количества.

В строке 33 список количества вхождений приравнивается к списку значений словаря со статистикой использования константных значений.

В строке 34 создается функция аппроксимации, принимающая на вход один аргумент «x» и имеющая 3 параметра «a, b, c».

В строке 35 функция аппроксимации задается, как показательная – « $a \times b^x + c$ » (символ «^» в коде соответствует возведению в степень).

В строке 36 осуществляется приближение функции аппроксимации к РКЗ путем подбора ее параметров.

В строке 37 из алгоритма возвращается таблица с РКЗ, а также кортеж параметров функции аппроксимации.

Используя Прототип, реализующий Метод, а также датасет ExeBench, был проведен эксперимент по построению РКЗ. Также были отобраны группы тестов, содержащих функции с ИК, предназначенным для компиляции, а именно следующие: «real_test», «valid_real», «synth_test», «valid_synth», «train_real_simple_io», «train_synth_simple_io».

Ход эксперимента с Прототипом приведен в Листинге 2; запись в круглых скобках в начале каждой строки содержит время запуска операции, а префикс «Step N» (перев. на русс. Шаг) указывает на выполняемый шаг Метода.

Листинг 2. Ход эксперимента с Прототипом

```
(20:54:04) Start
(20:54:04) Step 1. Loading the ExeBench dataset:
(20:54:04) from
'real_test\data_0_time1678114487_default.jsonl' --> OK
(2132 functions)
...
(20:59:53) from
'train_synth_simple_io\data_0_time1677914260_default.jsonl'
--> OK (4786 functions)
(21:00:00) Step 2. Extracting the function body (219077
functions) --> OK (219077 bodies)
(21:00:01) Step 3. Tokenizing the SC functions (219077 bod-
ies) --> OK (63968 constants)
(21:06:46) Step 4. Preprocessing constants (63968 constants)
--> OK
(21:06:47) Step 5. Collecting statistics (63968 constants) -
-> OK
(21:06:48) Step 6. Forming a table with the CVD (63968 con-
stants) --> OK
(21:06:49) Step 7. Make approximation of the CVD (63968) ...
OK (Y = 182451.24926513588 * 0.5822164967795688 ^ X +
1297.6581713063692, error = [5.73335455e+03 1.06349873e-02
2.14300283e+02]) --> OK
(21:06:49) Finish
```

Согласно Листингу 2, работа Прототипа заняла 12 минут 45 секунд, в процессе чего было загружено 219077 функций (на языке программирования C), из которых было выделено 63968 константных значений; предварительно, данную выборку можно считать удовлетворительной для обоснованного построения РКН.

Аппроксимация РКН функцией « $y = a \times b^x + c$ » дала следующую формулу (с округлением коэффициентов):

$$y = 182451.25 \times 0.58^x + 1297.66,$$

где x – порядковый номер константного значения; y – количество встретившихся констант в датасете

ЕхеВенч; ошибки каждого из параметров аппроксимирующей функции (т. е. a , b и c) указаны в Листинге 2 в прямоугольных скобках после префикса «error».

Результаты

В результате работы Прототипа был построен график РКЗ (красного цвета), а также его аппроксимация к функции « $y = a \times b^x + c$ » (зеленого цвета), что для первых 100 констант представлено на рисунке 1.; также на рисунке присутствует график, выражающий закон Ципфа (синего цвета).

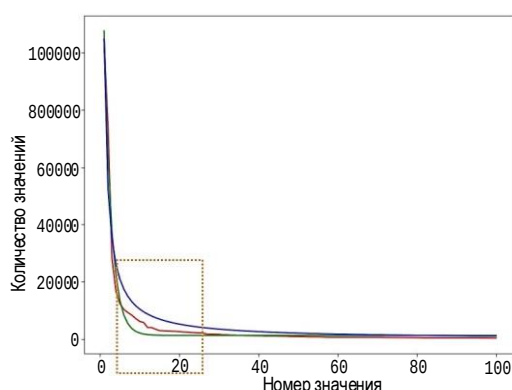


Рис. 1. Графики распределения константных значений для исходного кода программ на языке программирования C

Fig. 1. Distribution Graphs of Constant Values for the Source Code of Programs in the C Programming Language

Полученное РКЗ достаточно близко к аппроксимирующей функции за исключением области графика, выделенной оранжевым пунктирным прямоугольником – т. е. между константными значениями с порядковыми номерами (примерно) 5 и 25. Аналогичным образом РКЗ приблизительно соответствует закону Ципфа, что подчеркивает его корректность.

РКЗ для первых 50 элементов (отсортированных на Шаг 6 по мере убывания их количества) приведено в таблице 1; значение константы с 49-м номером соответствует двойным кавычкам.

ТАБЛИЦА 1. Распределение Топ-50 константных значений в ИК программ

TABLE 1. Distribution of Top-50 Constant Values in Programs Source Code

№ п/п	Значение	Количество	№	Значение	Количество
1	0	104731	26	11	2125
2	1	74503	27	64	1759
3	2	28142	28	14	1741
4	3	16724	29	«%d\n»	1681
5	4	12371	30	60	1677
6	10	10358	31	128	1495
7	5	9281	32	57	1491
8	8	8382	33	30	1393
9	16	7182	34	31	1365

№ п/п	Значение	Количество	№	Значение	Количество
10	7	6184	35	1000	1284
11	6	5781	36	45	1281
12	9	4040	37	17	1239
13	32	4028	38	24	1223
14	48	3459	39	«\n»	1178
15	100	2975	40	50	1162
16	15	2898	41	0.5	1151
17	65535	2835	42	47	1076
18	12	2751	43	42	1076
19	255	2716	44	1024	1072
20	65	2620	45	90	1051
21	«%d»	2488	46	256	1032
22	20	2445	47	99	1013
23	97	2306	48	40	919
24	4294967295	2244	49	«"»	911
25	13	2172	50	70	907

Непосредственная частота использования каждого константного значения в ИК может быть получена тривиальным образом путем деления всех значений в распределении на максимальное – т. е. соответствующее самой 1-й константе.

Предварительные выводы

Согласно построенному РКН (см. рисунок 1), а также значениям самих констант (см. таблицу 1), можно сделать следующие предварительные, но важные теоретико-практические выводы.

Во-первых, наиболее частым с позиции использования оказалась нулевая константа (на позиции 1), что довольно закономерно, поскольку «0», как правило, является специальным значением в алгоритмах (по крайней мере, на языке программирования C); например, для внутреннего представления булевого значения «Ложь», определения знака числа, сравнения указателя с нулевым, обнуления объекта и т. п.

Во-вторых, следующей по частоте константой идет значение «1», что частично обосновывается логикой, близкой к объяснению расположения константы «0» – внутренним представлением булевого значения «Истина»; также достаточно частой операцией во многих алгоритмах с циклами является инкрементация и декрементация целочисленных переменных (т. е. прибавление или вычитание из них единицы).

В-третьих, отличие РКЗ от двух других, теоретически полученных графиков объяснимо спецификой представления констант в реальных программах, в частности тем, что первые по порядку значения соответствуют числам 0 и 1, которые интерпретируются не только как элементы счет-

ного множества, но и как числовое представление булевских «Истина» и «Ложь»; как результат, аномальное превышение встречи в ИК «опускает» аппроксимирующий график (из-за нарушения в закономерности показательной функции) и «поднимает» график Ципфа (из-за того, что он строится по 1-му элементу). Это, в том числе, приводит к существенному (визуально) расхождению полученного распределения от других графиков на участке, выделенном пунктирным прямоугольником (с диапазоном абсциссы от 5 до 25).

В-четвертых, первые 5 констант имеют значения, соответствующие своим порядковым номерам в таблице, т. е. 0, 1, 2, 3 и 4. Такая закономерность объяснима тем, что алгоритмы зачастую содержат признаки реального мира и его субъектов (т. е. людей), которые достаточно часто оперируют небольшим количеством объектов – до 5; впрочем, между константами «4» и «5» расположена другая константа, о чем будет сказано далее.

В-пятых, нахождение значения «10» на высоком месте в РКН между «4» и «5» объяснимо принятым в мире использованием десятичного исчисления; также данное значение соответствует коду символа перевода строки, используемого для создания многострочных текстов.

В-шестых, на высоких местах в РКЗ оказались числа, соответствующие числу 2 в различных степенях: 2^0 – на позиции 2; 2^1 – на позиции 3; 2^2 – на позиции 5; 2^3 – на позиции 8; 2^4 – на позиции 9; 2^5 – на позиции 13; 2^6 – на позиции 27; 2^7 – на позиции 31; 2^8 – на позиции 19 и т. д. Данная закономерность может быть объяснена применением битовых полей и масок с одним установленным разрядом, что достаточно часто применяется в различных алгоритмах.

В-седьмых, нахождение в Топ-25 значений 255, 65535 и 4294967295 также вполне логично, т. к. данные числа соответствуют записи значения «-1» в переменных с размером 1, 2 и 4 байта.

В-восьмых, нахождение в Топ-50 значений 100 и 1000 соответствует той же логике, что и высокая позиция числа 10 – применимость чисел в реальной жизни, для решения задач которой ИК алгоритмов фактически и создается.

В-девятых, в Топ-50 попали следующие строковые (или символьные) константы – «"%d"», «"%d\n"», «"\n"» и «"»», которые соответствуют специальным конструкциям для указания формата вывода целочисленных значений, таких значений с переводом строки, самому переводу строки и пустой строке. Данные константы являются достаточно часто используемыми в ИК программ, формирующих и выводющих человекочитаемый текст.

И, в-десятых, среди первых 50 констант большинство оказалось целочисленными (55 значе-

ний), несколько – строковыми (4 значения) и только одно дробным – «0.5». Такую особенность можно обосновать распространенностью алгоритмов с нетривиальными формулами, логика которых основана на оценке близости дробного значения к ближайшему целому; например, при округлении числа.

Все десять сделанных основных выводов были подтверждены экспертно путем анализа ИК функций из датасета.

Генетический реинжиниринг

Несмотря на определенную значимость проведенного исследования и его результатов, основное применение РКЗ, как указывалось, заключается в развитии авторского направления ГРИ, предназначенного для получения ИК программы (а также более высокоуровневых представлений – алгоритмов, архитектуры и пр.) из ее МК. В его рамках решается оптимизационная задача подбора такого экземпляра ИК, который бы в точности компилировался в заданный МК. Один из подходов к решению данной задачи состоит в применении ГА, для чего генерируется популяция особей-экземпляров ИК, из которой выбираются программы, дающие после компиляции МК, наиболее близкий к исследуемому. Затем, над отобранными подобным образом «наилучшими» представителями популяции осуществляются операции скрещивания – перемешиванием конструкций для пары ИК, и мутации – случайным изменением конструкций ИК. Для качественного повышения оперативности работы ГРИ конструкции ИК программ создаются согласно формальному синтаксису языка программирования. При этом имена переменных и значения констант, очевидно, не относятся к области синтаксиса, а являются лексическим значением соответствующего токена. И если точные имена переменных для корректного выполнения программ не имеют существенного значения (поскольку назначаются разработчиками для улучшения понятности кода), то значения констант непосредственно влияют на логику выполнения. А т. к. полный перебор констант займет недопустимо большой промежуток времени, его ускорение путем использования списка наиболее часто используемых значений (т. е. полученного РКЗ) будет считаться качественной оптимизацией всего ГРИ. Таким образом, полученное РКЗ с точки зрения ГРИ является существенно значимым результатом.

Необходимо отметить, что, согласно полученным ранее результатам автора, реверс-инжиниринг МК в ИК для небольшого, но нетривиального математического выражения:

$$z = x^*(y - (x/y))$$

вручную экспертом занимает около 5 минут. Применение полного перебора конструкций ИК по следующему формальному синтаксису такого рода выражений:

```
1: expr_assign ::= ident, '=', expr ;  
2: expr ::= ident | expr_oper ;  
3: expr_oper = ident, oper, ident | ident, oper, '(',  
  expr_oper, ')';  
4: oper = '+' | '-' | '*' | '/';  
5: ident = 'x' | 'y' | 'z' ;
```

в полностью автоматическом режиме займет соизмеримые 10 минут. Первые же эксперименты с прототипом для проведения ГРИ позволили получить ИК менее чем за 10 секунд, что подтверждает перспективность направления (по крайней мере, для отдельных условия и сценариев применения).

Заключение

В работе решается частная задача получения РКЗ для ИК программ на языке С, вследствие чего описывается соответствующий Метод и его реализация в виде Прототипа, а также проводится эксперимент с получением искомого распределения. Близость РКЗ к аппроксимирующей показательной функции (т. е. наличие закономерности) и закону Ципфа (т. е. отражение эмпирических зависимостей) частично обосновывает корректность результата (в частности, выбор датасета EkeBench). Новизна исследования заключается в том, что РКН

для ИК программ на языке программирования С получено впервые. Основная теоретическая значимость состоит в получении новых фундаментальных знаний касательно особенностей и закономерностей конструкций ИК (которые могут быть расширены и на другие языки программирования), а практическая значимость – в применении распределения для большого спектра задач (указанных ранее во введении), включая ГРИ, который сам по себе является качественно новым направлением.

Продолжением работы может стать получение подобных РКН для ИК других языков программирования с применением датасетов большого объема, их сравнение и, гипотетически, обобщение с целью получения единой закономерности, которая будет являться не только прикладной таблицей-справочником, но и отражать ключевые «связки» в мыслительной деятельности человека (интерпретируемые, как «переплетения нитей», говоря словами одного из величайших философов XX века Л. Витгенштейна [17]) по решению практических задач вне зависимости от их специфики и области применения (например, использование исключительно бинарной логики, оперирующей значениями 0 и 1, определяя тем самым дискретность и, следовательно, ограниченность восприятия человеком окружающего мира).

Список источников

1. Касторнов А.Ф., Касторнова В.А. Языки программирования и их роль в становлении предметной области "Информатика" // Педагогическая информатика. 2016. № 1. С. 59–68. EDN:VUUFHV
2. Коновалов Г.Г. Измерение качества чистого кода: метрики и инструменты анализа // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 102-5. С. 25–28. DOI:10.18411/trnio-10-2023-244. EDN:GDPWLC
3. Хлыстов И.С., Жарова О.Ю. Генетическое программирование // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 4(9). С. 62–67. EDN:XHJVNH
4. Израилов К.Е. Концепция генетической декомпиляции машинного кода телекоммуникационных устройств // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 10–17. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-95-109. EDN:AIOFPM
5. Kotenko I., Izrailov K., Buinevich M. Analytical Modeling for Identification of the Machine Code Architecture of Cyber-physical Devices in Smart Homes // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 3. PP. 1017. DOI:10.3390/s22031017
6. Буйневич М.В., Израилов К.Е. Способ классификации файлов на базе технологии машинного обучения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 34–41. DOI:10.46418/2079-8199_2020_1_6. EDN:MDPYTV
7. Израилов К.Е. Прогнозирование размера исходного кода бинарной программы в интересах ее интеллектуального реверс-инжиниринга // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 4(62). С. 13–25. DOI:10.21681/2311-3456-2024-4-13-25. EDN:NRFCND
8. Кучерова С.В. Закон Ципфа и его приложения в области лингвистики // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. 2020. № 10. С. 107–108. EDN:QRNCOY
9. Leonov N., Buinevich M., Chechulin A. Top-20 Weakest from Cybersecurity Elements of the Industry Production and Technology Platform 4.0 Information Systems // Proceedings of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon, Sochi, Russian, 25–29 March 2024). IEEE, 2024. PP. 668–675. DOI:10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515678
10. Фомин А.И. Оценка сложности исследования дизассемблированного кода исполняемых программ // Естественные и технические науки. 2021. № 7(158). С. 210–211. EDN:UBNPCY
11. Ормонова Э.М. Определение качества программного продукта на основе теории графов // Наука. Образование. Техника. 2021. № 1(70). С. 37–44. EDN:ITSANI
12. Лебедев В.В. Деобфускация control flow flattening средствами символьного исполнения // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2021. № 14. С. 134–138. DOI:10.17223/2226308X/14/29. EDN:ITNATQ
13. Королев В.Ю., Смелянский Р.Л., Смелянский Т.Р., Шалимов А.В. Об оценивании частоты выполнения фрагментов кода последовательной программы // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 39. DOI:10.7868/S0002338815040095. EDN:RXZZRT

14. Armengol-Estapé J., Woodruff J., Brauckmann A., Magalhães J.W.S., O'Boyle M.F.P. ExeBench: an ML-scale dataset of executable C functions // *Proceedings of the 6th ACM SIGPLAN International Symposium on Machine Programming* (New York, USA, 13 June 2022). ACM, 2022. PP. 50–59. DOI:10.1145/3520312.3534867
15. Toomey W. Ccompare: Code clone detection using hashed token sequences // *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Clones (IWSC, Zurich, Switzerland, 04 June 2012)*. IEEE, 2012. PP. 92–93. DOI:10.1109/IWSC.2012.6227881
16. Samuelsson C. Comparative evaluation of the stochastic simplex bisection algorithm and the SciPy.Optimize module // *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS, Lodz, Poland, 13–16 September 2015)*. IEEE, 2015. PP. 573–578. DOI:10.15439/2015F47
17. Барляева Е.А. Мыслительная деятельность человека в метафорах и сравнениях // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация*. 2016. № 3. С. 15–18. EDN:WKNUBD

References

1. Kastornov A.F.1, Kastornova V.A. Programming languages and their role in formation of subject domain of "Information Scientist. *Pedagogical Informatics*. 2016;1:59–68. (in Russ.) EDN:VUUFHV
2. Konovalov G.G. Measuring the quality of clean code: Metrics and analysis tools. *Tendentsii razvitiia nauki i obrazovaniia*. 2023;102-5:25-28. (in Russ.) DOI:10.18411/trnio-10-2023-244. EDN:GDPWLC
3. Hlystov I.S., Zharova O.Y. Genetic programming. *Electronic Journal: Science, Technology and Education*. 2016;4(9):62–67. (in Russ.) EDN:XHJVHH
4. Izrailov K. The Genetic Decompilation Concept of the Telecommunication Devices Machine Code. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2021;7(4):95–109. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-95-109. EDN:AIOFPM
5. Kotenko I., Izrailov K., Buinevich M. Analytical Modeling for Identification of the Machine Code Architecture of Cyber-physical Devices in Smart Homes. *Sensors*. 2022;22(3):1017. DOI:10.3390/s22031017
6. Buynevich M.V., Izrailov K.E. Method for classification of files on the basis of machine training technology. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences*. 2020;1:34–41. (in Russ.) DOI:10.46418/2079-8199_2020_1_6. EDN:MDPYTW
7. Izrailov K.E. Predicting the size of the source code of a binary program in the interests of its intellectual reverse engineering. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2024;4(62):13–25. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2024-4-13-25. EDN:NRFCND
8. Kucheroва S.V. Zipf's law and its applications in the field of linguistics. *Nekotorye voprosy analiza algebrы geometrii i matematicheskogo obrazovaniia*. 2020;10:107–108. (in Russ.) EDN:QRNCOY
9. Leonov N., Buinevich M., Chechulin A. Top-20 Weakest from Cybersecurity Elements of the Industry Production and Technology Platform 4.0 Information Systems. *Proceedings of the International Russian Smart Industry Conference, SmartIndustryCon, 25–29 March 2024, Sochi, Russian*. IEEE; 2024. p.668–675. DOI:10.1109/SmartIndustryCon61328. 2024.10515678
10. Fomin A.I. Estimation of the difficulty of the disassembled code of the executed programs. *Natural and technical sciences*. 2021;7(158):210–211. (in Russ.) EDN:UBNPCY
11. Ormonova E.M. Determining the quality of the software product based on the theory of graphs. *Science. Education. Technology*. 2021;1(70):37–44. (in Russ.) EDN:ITSANI
12. Lebedev V.V. Control flow flattening deobfuscation using symbolic execution. *Applied Discrete Mathematics. Supplement*. 2021;14:134–138. (in Russ.) DOI:10.17223/2226308X/14/29. EDN:ITNATQ
13. Korolev V.Y., Smelyanskii R.L., Smelyanskii T.R., Shalimov A.V. On the estimation of the execution frequency of sequential program code snippets. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015;54(4):540–545. DOI:10.1134/S106230715040097. EDN:UFCQZB
14. Armengol-Estapé J., Woodruff J., Brauckmann A., Magalhães J.W.S., O'Boyle M.F.P. ExeBench: an ML-scale dataset of executable C functions. *Proceedings of the 6th ACM SIGPLAN International Symposium on Machine Programming, 13 June 2022, New York, USA*. ACM; 2022. p.50–59. DOI:10.1145/3520312.3534867
15. Toomey W. Ccompare: Code clone detection using hashed token sequences. *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Clones, IWSC, 04 June 2012, Zurich, Switzerland*. IEEE; 2012. p.92–93. DOI:10.1109/IWSC.2012.6227881
16. Samuelsson C. Comparative evaluation of the stochastic simplex bisection algorithm and the SciPy.Optimize module. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS, 13–16 September 2015, Lodz, Poland*. IEEE; 2015. p.573–578. DOI:10.15439/2015F47
17. Barlyaeva E.A. Human mental activity in metaphors and similies. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Linguistics and intercultural communication*. 2016;3:15–18. (in Russ.) EDN:WKNUBD

Статья поступила в редакцию 23.09.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 31.10.2024.

The article was submitted 23.09.2024; approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 31.10.2024.

Информация об авторе:

**ИЗРАИЛОВ
Константин Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук
 <https://orcid.org/0000-0002-9412-5693>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

22³¹
десятилетие
науки и технологий

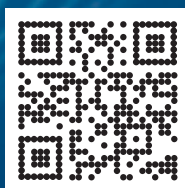
22—25 апреля 2025

СВЯЗЬ

37-я международная
выставка «Информационные
и коммуникационные технологии»

Экспозиция «Навитех» —
«Навигационные системы, технологии и услуги»

www.sviaz-expo.ru



Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



ExpO Rating

12+
Реклама

Организатор

Под патронатом

В рамках



План издания научной литературы 2024 г., п. 10

Усл.-печ. л.
17,0

Формат
60×84_{1/8}

Заказ
№ 1613

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

E-mail: tuzs@sut.ru Web: tuzs.sut.ru VK: vk.com/spbtuzs

