



Том 12. № 3
2026

ISSN 1813-324X (Print)
ISSN 2712-8830 (Online)

ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Темы номера:

- ✓ Туманные альянсы:
децентрализованная облачная структура
для городских сетевых вселенных
- ✓ Реализация услуг дополненной реальности
- ✓ Оценка граничных сквозных задержек
передачи трафика в сегменте
Fronthaul сетей 4G/5G

Vol. 12. Iss. 3
2026

PROCEEDINGS
OF TELECOMMUNICATION UNIVERSITIES

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 12. № 3

Proceedings of Telecommunication Universities

Vol. 12. Iss. 3

Санкт-Петербург

2026

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. д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
Главный редактор им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Владыко А.Г. к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
Зам. Главного редактора 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 <i>Editor-in-chief</i>	DSc, prof., The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint Petersburg, Russia
A.G. Vladyko <i>Deputy editor-in-chief</i>	PhD, associate prof., The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University 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. Tihamiyu	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-Bruevich 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-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint Petersburg, Russia
Yu.A. Kovalgin	DSc, prof., The Bonch-Bruevich 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-Bruevich 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. 606/1

Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022

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.**, изображение на обложке создано с помощью Magnific (www.magnific.com)

Publisher: Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruevich 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

E-mail: tuzs@sut.ru

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

Executive Editor **Tatarnikova I.M.**

Commissioning Editor **Yashugin D.N.**

Design: **Korovin V.M.**, cover image created with Magnific (www.magnific.com)

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ / IMPRINT

Дата выхода в свет: 30.06.2026
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: 30.06.2026
Circulation: 1000 copies. Free price.

Printed in the printing office
Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications»



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Левина А.Б., Панченко Н.А.
Повышение нелинейности булевых функций
адаптивной модификацией вейвлет-спектра

7

Levina A.B., Panchenko N.A.
Increasing the nonlinearity of Boolean functions
by adaptive wavelet spectrum modification

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Диязитдинов Р.Р.
Сокращение вычислительной сложности
при совмещении одномерных сигналов с пропусками
с помощью метода пирамид

17

Diyazitdinov R.R.
Computation cost reduction for superposition
of one-dimensional signal with gaps by pyramid
method

Козлов А.В., Петушков А.М., Саковский Е.А., Соловьёв Д.А.
Прием и обработка сигналов в перспективных образцах
навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС

26

Kozlov A.V., Petushkov A.M., Sakovsky E., Solovyov D.A.
Reception and processing of signals in prospective
models of user navigation equipment for GLONASS

Маколкина М.А., Стерликов А.Д.
Анализ и исследование реализации услуг дополненной
реальности

35

Makolkina M.A., Sterlikov A.D.
Analysis and research of AR services
implementation

Росляков А.В., Герасимов В.В.
Модель и метод оценки граничных сквозных задержек
передачи трафика в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G
на базе технологии TSN Ethernet с использованием
кредитного формирователя

44

Roslyakov A.V., Gerasimov V.V.
Model and worst-case end-to-end traffic delay analysis
in the Fronthaul segment of 4G/5G networks based
on TSN Ethernet technology using credit based shaper

Сердюков П.С., Румянцев К.Е.
Влияние параметров телевизионных средств
и геометрии съемки на точность определения
разновысотности головок тепловыделяющих сборок
методом параллакс-сдвига

62

Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E.
Influence of television system parameters
and imaging geometry on the accuracy of fuel assembly
head height difference measurement using
the parallax-shift method

Сторожук Н.Л.
Оценка предельного количества потребителей
в домене TSN при заданных параметрах качества
синхронизации

72

Storozhuk N.L.
Estimation of the maximum consumers number
in a TSN domain with synchronization quality
parameters set

Тханг Д.В., Волков А.Н.
Туманные альянсы: децентрализованная облачная
структура с федеративным машинным обучением
для городских сетевых вселенных

81

Thang D.V., Volkov A.N.
Fog alliances: a decentralized cloud structure
with federated machine learning for citiverses

*Якушенко С.А., Копыльцов В.Ю., Ларионов А.А.,
Васильева Д.В., Дворников С.В.*
Модель оценки разведзащищенности элементов
локальной навигационной системы

98

*Yakushenko S.A., Kopyltsov V.Yu., Larionov A.A.,
Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V.*
Model for assessing the intelligence security
of local navigation system elements

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Грызунов В.В.
Архитектурная модель ONYX для X-адаптивного
управления информационной системой в условиях
дестабилизирующих факторов произвольной природы

112

Gryzunov V.V.
Architectural model ONYX for X-adaptive control
of information systems under arbitrary destabilizing
factors

Пелих Д.А., Шаталова Н.В.
Разработка программных средств адаптивного
управления дорожным трафиком
и оценка их эффективности

129

Pelikh D.A., Shatalova N.V.
Adaptive traffic management software development
and evaluation of its effectiveness

Рабин А.В., Липатников В.А., Андреев И.А.
Метод адаптивного выбора режима информационного
обмена в системе связи для оптимизации управления
группировкой робототехнических комплексов
при кибервоздействиях

139

Rabin A.V., Lipatnikov V.A., Andreev I.A.
Adaptive Selection Method for the Information
Exchange Mode in a Communication System
for Optimizing Control of a Robotic Complex Group
under Cyber Impacts

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Научная статья

УДК 519.872

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-7-15>

EDN:BOSQJI



Повышение нелинейности булевых функций адаптивной модификацией вейвлет-спектра

Алла Борисовна Левина✉, alla_levina@mail.ru

Никита Андреевич Панченко, n9218972301@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность. Булевы функции являются основой современных криптографических систем и алгоритмов шифрования, хеширования и генерации псевдослучайных последовательностей. Их ключевые свойства – высокая нелинейность и сбалансированность. Однако традиционные методы построения булевых функций с высокой нелинейностью основаны на применении бент-функций, которые обладают идеальными спектральными свойствами, но ограничены областью существования (только для четного числа переменных) и требуют сложных алгебраических конструкций. Это создает противоречие между теоретической оптимальностью бент-структур и их низкой практической реализуемостью. Таким образом, актуальной научной задачей является разработка методов формирования булевых функций, приближенных по спектральным характеристикам к бент-функциям, но пригодных для практического применения.

Цель исследования заключается в повышении нелинейности булевых функций за счет разработки метода адаптивной модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения, позволяющего перераспределять спектральную энергию и усиливать высокочастотные компоненты без усложнения алгебраической структуры функций.

Для достижения цели использованы **методы** спектрального анализа, дискретного вейвлет-преобразования Хаара, алгоритмизация и экспериментальное моделирование. Вейвлет-анализ применяется не только для декомпозиции функции, но и как инструмент управляемого спектрального преобразования.

Решение. Предложен метод адаптивной коррекции детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения, обеспечивающий перераспределение спектральной плотности в сторону высокочастотных компонент. Проведены эксперименты для булевых функций размерностей $n = 8, 10$ и 12 , подтверждающие увеличение спектральной нелинейности на $12\text{--}18\%$ по сравнению с исходными функциями.

Новизна. Впервые предложено применение дискретного вейвлет-преобразования для целенаправленного повышения спектральной нелинейности булевых функций. Ранее оно использовалось преимущественно для анализа сигналов. Введена формула адаптивной модификации детализирующих коэффициентов, позволяющая управлять спектральной структурой функций без привлечения сложных алгебраических преобразований.

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании нового подхода к формированию булевых функций на основе спектрального моделирования вейвлет-коэффициентов.

Практическая значимость результатов заключается в том, что предложенный подход открывает возможность для дальнейшей автоматизации процессов синтеза булевых функций и S-блоков с заданными спектральными характеристиками. Это может быть использовано при разработке новых стандартов шифрования и оценке стойкости алгоритмов к перспективным видам криптоанализа.

Ключевые слова: булевы функции, вейвлет-преобразование, нелинейность, спектр Уолша, криптография

Ссылка для цитирования: Левина А.Б., Панченко Н.А. Повышение нелинейности булевых функций адаптивной модификацией вейвлет-спектра // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 7–15. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-7-15. EDN:BOSQJI

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-7-15>

EDN:BOSQJI

Increasing the Nonlinearity of Boolean Functions by Adaptive Wavelet Spectrum Modification

✉ Alla B. Levina, alla_levina@mail.ruNikita A. Panchenko, n9218972301@gmail.comSaint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

Annotation

Relevance. Boolean functions are the foundation of modern cryptographic systems and algorithms for encryption, hashing, and pseudorandom sequence generation. Their key properties are high nonlinearity and balancedness. However, traditional methods for constructing Boolean functions with high nonlinearity are based on the use of bent functions, which have ideal spectral properties but are limited in their domain of existence (only for an even number of variables) and require complex algebraic constructions. This creates a contradiction between the theoretical optimality of bent structures and their low practical feasibility. Therefore, a pressing scientific challenge is the development of methods for generating Boolean functions with spectral characteristics close to bent functions, but suitable for practical application. **The aim of this study** is to improve the nonlinearity of Boolean functions by developing a method for adaptively modifying the detailing coefficients of wavelet decomposition, allowing for the redistribution of spectral energy and enhancement of high-frequency components without complicating the algebraic structure of the functions.

Methods. Spectral analysis, the discrete Haar wavelet transform, algorithmization, and experimental modeling were used to achieve this goal. Wavelet analysis is used not only for function decomposition but also as a tool for controlled spectral transformation.

Solution. An algorithm for adaptively correcting the detailing coefficients of wavelet decomposition is proposed, ensuring the redistribution of spectral density toward high-frequency components. Experiments were conducted for Boolean functions of dimensions $n = 8, 10,$ and 12 , confirming an increase in spectral nonlinearity by 12–18 % compared to the original functions. **Novelty.** This paper proposes for the first time the use of a discrete wavelet transform to purposefully enhance the spectral nonlinearity of Boolean functions. Previously, it was used primarily for signal analysis. A formula for adaptive modification of detailing coefficients is introduced, allowing for control of the spectral structure of functions without resorting to complex algebraic transformations.

The theoretical significance of this work lies in the substantiation of a new approach to generating Boolean functions based on spectral modeling of wavelet coefficients.

The practical significance of the results lies in the fact that the proposed approach opens the possibility of further automating the synthesis of Boolean functions and S -boxes with specified spectral characteristics. This can be used in the development of new encryption standards and in assessing the resistance of algorithms to advanced types of cryptanalysis.

Keywords: boolean functions, wavelet transform, nonlinearity, Walsh spectrum, cryptography

For citation: Levina A.B., Panchenko N.A. Increasing the Nonlinearity of Boolean Functions by Adaptive Wavelet Spectrum Modification. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):7–15. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-7-15. EDN:BOSQJI

ВВЕДЕНИЕ

Булевы функции являются ключевыми компонентами современных криптографических систем, они применяются при построении шифров, хеш-функций и генераторов псевдослучайных после-

довательностей. Для обеспечения стойкости к криптоанализу важнейшими свойствами функций выступают высокая нелинейность, сбалансированность и устойчивость к линейным и дифференциальным атакам [1, 2]. Эталоном в этой области слу-

жат бент-функции, обладающие максимальной нелинейностью и равномерным спектром Уолша. Однако их практическое применение ограничено, они существуют только для четного числа переменных, не являются сбалансированными и требуют сложных алгебраических конструкций [2, 3]. Классические методы их построения масштабируются плохо, что делает невозможным использование бент-функций в реальных криптосистемах.

В настоящее время актуальной задачей является разработка методов формирования булевых функций, приближенных по спектральным характеристикам к бент-структуре, но более удобных для практического использования [4–6]. Традиционные подходы основаны на преобразовании Уолша – Адамара [5], которое эффективно для спектрального анализа, но не позволяет локально управлять спектром функции.

Перспективным инструментом для решения этой задачи является дискретное вейвлет-преобразование, позволяющее разложить функцию на многомасштабные компоненты и модифицировать ее высокочастотные характеристики. В отличие от ряда предыдущих исследований [5], где вейвлет-преобразование применялось исключительно для анализа, в данной работе предлагается его использование для спектральной модификации булевых функций. Цель работы – разработать метод адаптивной коррекции детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения, увеличивающего нелинейность булевых функций без усложнения их алгебраической структуры.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Булевы функции и спектр Уолша

Булевы функции играют ключевую роль в современных информационных технологиях, особенно в областях криптографии и теории кодирования.

Определение 1. Булева функция – это отображение вида:

$$f: F_2^n \rightarrow F_2,$$

где $F_2^n = \{0,1\}$ – поле, состоящее из двух элементов; n – количество переменных функции.

Одним из важнейших направлений использования булевых функций является криптография. Булевы функции применяются при построении S-блоков, генераторов псевдослучайных последовательностей и хеш-функций, которые определяют стойкость шифров. Для обеспечения криптографической стойкости булевы функции должны обладать рядом специфических свойств, в первую очередь, высокой нелинейностью, сбалансированностью и устойчивостью к линейному и дифференциальному анализу [1, 2].

Нелинейность функции – это минимальное расстояние по Хэммингу между функцией и множеством всех аффинных функций:

$$NL(f) = \min_{g \in A_n} d_H(f, g), \tag{1}$$

где A_n – множество всех аффинных функций; $d_H(f, g)$ – расстояние по Хэммингу между функциями f и g [2, 7].

Чем выше нелинейность, тем более затруднено применение различных аналитических атак, особенно тех, которые используют линейные, или близкие к линейной зависимости. Эта характеристика функций является одной из ключевых при проектировании компонентов шифров, таких как S-блоки и поточные генераторы. Еще одним важным криптографическим свойством булевых функций является сбалансированность.

Определение 2. Булева функция называется сбалансированной, если она принимает значения 0 и 1 одинаковое количество раз на всем множестве входов.

В криптографии сбалансированность важна для того, чтобы выход функции был непредсказуемым, если функция склоняется к одному значению, это может дать возможность атаки через статистический анализ.

Анализ булевых функций с точки зрения их криптографических характеристик требует не только изучения их структурных свойств, таких как сбалансированность и нелинейность, но и применения спектральных методов. Одним из наиболее эффективных методов спектрального анализа является преобразование Уолша – Адамара, позволяющее описать булеву функцию в частотной области и получить точные численные характеристики [2, 7, 8].

Преобразование Уолша – Адамара функции f представляет собой целочисленную функцию, которая задана на множестве Z_2^n равенством:

$$W(v) = \sum_{u \in Z_2^n} (-1)^{\langle u, v \rangle \oplus f(u)}, \tag{2}$$

где $\langle u, v \rangle$ – скалярное произведение векторов по модулю 2.

Спектр Уолша отражает корреляцию функции с линейными функциями. Чем выше значение спектра, тем выше корреляция с соответствующей функцией, что нежелательно для криптографии [1, 8].

Рассмотрим основные свойства спектра Уолша.

1) Равенство Парсевала показывает сохранение энергии при переходе из временной области в спектральную:

$$\sum_{u \in Z_2^n} (W(v))^2 = 2^{2n}. \tag{3}$$

2) Связь с нелинейностью функции. Значение нелинейности булевой функции выражается через значение спектра. Чем меньше максимальное значение спектра Уолша, тем выше нелинейность функции.

Нелинейность можно рассчитать по формуле:

$$NL(f) = 2^{n-1} - \frac{1}{2} * \max_u |W_f(u)|. \quad (4)$$

3) Сбалансированность функции. Функция, которая принимает значения 0 и 1 одинаковое количество наборов; если она сбалансирована, то выполняется равенство:

$$W_f(0) = 0.$$

Спектр Уолша не только предоставляет количественное описание корреляционных свойств булевой функции, но и служит основным инструментом для анализа ее нелинейности – ключевого критерия криптографической стойкости. Это позволяет выделить особый подкласс – бент-функции, обладающие экстремальными спектральными свойствами.

Определение 3. Бент-функция – это булева функция, у которой значения всех коэффициентов спектра Уолша равна $\pm 2^{\frac{n}{2}}$:

$$|W(v)| = 2^{\frac{n}{2}}.$$

Модуль всех коэффициентов спектра Уолша является постоянным и достигает теоретического максимума [2, 7]. Это свойство делает бент-функции идеальными с точки зрения спектральных характеристик.

Особенности бент-функций:

- существуют только для четного n [2, 7];
- несбалансированные (число единиц и нулей различается);
- спектр строго равномерный по модулю.

В криптографии бент-функции используются как базовые блоки при построении более сложных структур, таких как векторные функции (S-блок), защищенные генераторы ключевого потока и хеш-функции.

Дискретное вейвлет-преобразование

Одним из ключевых подходов к анализу и формированию булевых функций с высокой нелинейностью является спектральный метод. Традиционно для этих целей используется преобразование Уолша – Адамара, позволяющее оценить отклонение булевой функции от линейных отображений. Однако данный подход не обеспечивает локальной оценки структуры функции, поскольку глобален по своей природе.

Вейвлет-преобразование предлагает альтернативный и дополнительно информативный способ

представления булевой функции в виде совокупности частотно-локализованных компонент. Оно позволяет рассматривать структуру функции на множестве масштабов, идентифицируя как общую тенденцию ее изменения (аппроксимацию), так и локальные вариации (детализацию). Переход к вейвлет-представлению открывает возможность направленного управления локальной спектральной структурой функции, что может быть использовано для формирования или модификации функций с целевой нелинейностью.

Дискретное вейвлет-преобразование – математическое преобразование цифрового сигнала, при котором определяются локальные особенности сигнала в различных частотных диапазонах без потери информации о временной структуре. Теоретический фундамент дискретного вейвлет-преобразования базируется на предложенной С. Малла концепции многомасштабного анализа [9] и теории построения компактных ортогональных базисов, детально изложенной в трудах И. Добеши [10]. В отличие от глобального преобразования Уолша – Адамара, вейвлет-анализ позволяет выявлять локальные особенности функции. Применение дискретного вейвлет-преобразования к анализу дискретных структур и функций на конечных интервалах обосновано в работах Ю.К. Демьяновича [11], где вейвлет-разложения рассматриваются как эффективный инструмент адаптивной аппроксимации.

На практике дискретного вейвлет-преобразования прямое использование вейвлет-функций и функций масштабирования очень затруднено и ресурсоемко: необходимо генерировать все их сдвиги и масштабы, а также вычислять большое количество численных интегралов или скалярных произведений. Поэтому для удобства вычисления основным методом реализации данного типа преобразования является использование цифровых фильтров. При данном методе выполняется линейная фильтрация и субдискретизация сигнала [8, 12].

В рамках дискретного вейвлет-преобразования используются два основных фильтра:

- низкочастотный $h[n]$ (с помощью данного фильтра из сигнала извлекается его аппроксимирующая составляющая, а именно сглаженное, крупномасштабное приближение);
- высокочастотный $g[n]$ (данный фильтр выделяет детализирующую информацию сигнала, а именно его высокочастотные особенности: скачки, шум, границы).

Эти фильтры реализуются как конечные последовательности коэффициентов, соответствующие выбранному семейству вейвлетов. На практике фильтрация выполняется как свертка сигнала $x[n]$ с соответствующим фильтром, за которой следует процедура субдискретизации:

$$\begin{aligned}
 A[n] &= \sum_{k=0}^{2n} h[k] \cdot x[2n - k], \\
 D[n] &= \sum_{k=0}^{2n} g[k] \cdot x[2n - k],
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где $A[n]$ – аппроксимирующие коэффициенты; $D[n]$ – детализирующие коэффициенты; $h[k]$ и $g[k]$ – коэффициенты фильтров низких и высоких частот соответственно.

Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты представляют собой разложение сигнала на его структурные уровни, глобальные формы и локальные особенности. Они позволяют эффективно анализировать сигналы, выявлять важные события и изменения, а также применять преобразование к задачам в различных областях.

Аппроксимирующие коэффициенты несут информацию о глобальной структуре сигнала, включая его форму, тренды и медленно изменяющиеся характеристики. Они отвечают за крупномасштабное приближение сигнала и позволяют анализировать его на более общем уровне, без учета мелких деталей. Значения этих коэффициентов отражают степень выраженности медленно изменяющихся компонентов сигнала в различных временных интервалах.

Детализирующие коэффициенты, напротив, отражают локальные особенности сигнала, такие как границы, переходы, всплески, шумовые выбросы и другие высокочастотные компоненты, они критически важны для анализа резких переходов в сигнале, позволяя точно определить места, где происходят значимые изменения. Интерпретируя значения детализирующих коэффициентов, можно судить о характере и интенсивности изменений в сигнале, высокие значения по модулю свидетельствуют о резких изменениях, таких как обрыв, край или шумовой пик, тогда как значения, близкие к нулю, указывают на гладкий и однородный участок.

Одним из наиболее простых примеров дискретного вейвлет-преобразования является преобразование Хаара. Данное преобразование представляет исходный сигнал в виде набора аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, которые рассчитываются по формулам:

$$a_k = \frac{f_{2k} + f_{2k+1}}{\sqrt{2}}, d_k = \frac{f_{2k} - f_{2k+1}}{\sqrt{2}}.
 \tag{6}$$

Вейвлет Хаара широко используется при реализации дискретного вейвлет-преобразования благодаря простоте его структуры и вычислительной реализации, что позволяет получить поуровневое разложение функции без усложнения алгоритмической реализации.

МЕТОД АДАПТИВНОЙ МОДИФИКАЦИИ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ

Булевы функции занимают ключевое место в криптографии, теории кодирования и построении логических схем. Особый интерес в этих приложениях вызывают функции с высокой нелинейностью, поскольку именно они обеспечивают устойчивость к линейному и дифференциальному криптоанализу. Соответственно, одной из важных задач является генерация функций с такими свойствами. Одним из подходов к решению этой задачи является использование спектральных методов анализа, в частности вейвлет-преобразований, позволяющих локализовать высокочастотные особенности функции. Ключевую роль в таких анализах играют детализирующие коэффициенты, изменение которых может существенно повлиять на спектральную структуру функции и, как следствие, на ее нелинейность [8, 13]. Именно детализирующие коэффициенты вейвлет-преобразования определяют наличие скрытых линейных зависимостей, предсказуемость поведения и криптографическую стойкость функции. Их анализ и контролируемая модификация являются основой предлагаемого метода.

На рисунке 1 представлены детализирующие коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования (вейвлет Хаара) для булевых функций при $n = 6$.

Можно сделать следующие выводы:

- в линейной функции (рисунок 1а), представленной формулой $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = x_1 \oplus x_2$, доминируют нулевые значения, что отражает минимальную частотную сложность;
- средне нелинейная функция (рисунок 1б), представленная формулой $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (x_1 \wedge x_2) \oplus x_3$, демонстрирует более разнообразную и сложную структуру, но при этом распределение коэффициентов остается неравномерным;
- бент-функция (рисунок 1с), имеющая вид $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = x_1x_4 \oplus x_2x_5 \oplus x_3x_6 \oplus x_4x_6$, показывает наибольшую плотность и равномерность в распределении детализирующих коэффициентов.

Значения коэффициентов бент-функции разбросаны по всему набору уровней преобразования и обладают высокой амплитудой, что указывает на отсутствие локальной гладкости. Поскольку структура детализирующих коэффициентов определяет нелинейность функции, ее спектральную плоскость и устойчивость, модификация этих коэффициентов позволяет управлять приближать произвольную булеву функцию к бент-структуре. Целью такой модификации является перераспределение спектральной энергии в сторону более равномерного покрытия высокочастотных компонент, а также подавление доминирующих низкочастотных элементов [7, 8].

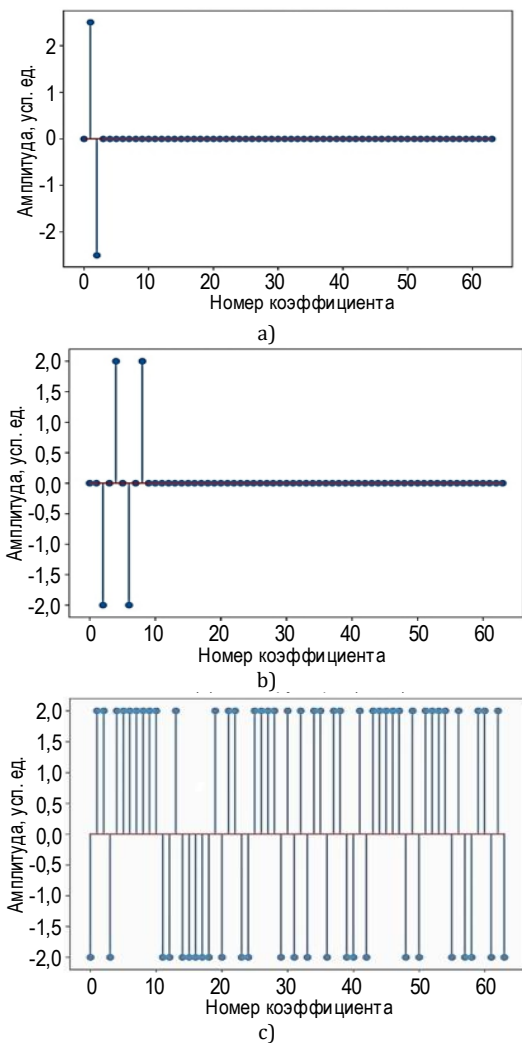


Рис. 1. Детализирующие коэффициенты разных видов функций

Fig. 1. Detailing Coefficients for Different Types Functions

Для достижения этой цели рассмотрим метод модификации, применяемый к произвольной булевой функции.

$$d'_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k}, & \text{если } |d_{j,k}| \geq T \\ A_j * \text{sign}(d_{j,k}) * (1 + \mu_{j,k}) * d_{\max}^{(j)} + \varepsilon_{j,k}, & \text{если } |d_{j,k}| < T \end{cases} \quad (8)$$

Этап 5. Бинаризация.

Преобразовать полученный сигнал обратно в булеву функцию:

$$\widehat{f}(x) = \begin{cases} 1, & g(x) < \tau \\ 0, & g(x) \geq \tau \end{cases}$$

В рамках предлагаемого метода на практике достаточно использовать фиксированное значение порога $\tau = 0$, что соответствует бинаризации по знаку сигнала. Однако при более сильной модификации вейвлет-коэффициентов может быть полезен адаптивный выбор порога (например, по среднему или медиане сигнала), либо подбор порога, оптимизирующего нелинейность на выходе.

Входные данные:

- булева функция F ;
- параметры модификации (масштабирующий коэффициент, порог модификации, случайное отклонение, шумовой сдвиг).

Выходные данные:

- новая булева функция \widehat{F} ;
- нелинейность новой функции $NL(\widehat{F})$.

Этап 1. Преобразование в вещественную форму.

Для применения дискретного вейвлет-преобразования к булевой функции необходимо представить ее в вещественной форме.

Бинарные значения функции $f(x) \in \{0,1\}$ преобразуются в вещественные по следующему правилу:

$$f'(x) = (-1)^{f(x)}. \quad (7)$$

Этап 2. Вычислить дискретное вейвлет-преобразование над $f'(x)$ с базисом Хаара и получить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты для всех уровней.

Этап 3. Модификация коэффициентов.

Произвести модификацию каждого детализирующего коэффициента, применяя формулу (8), где $d_{j,k}$ – исходный детализирующий коэффициент на уровне j , позиции k ; T – порог модификации; A_j – масштабный коэффициент на уровне j ; $\text{sign}(d_{j,k})$ – знак исходного коэффициента, сохраняющий направление воздействия; $\mu_{j,k}$ – случайная величина для внесения нерегулярности в амплитуду; $d_{\max}^{(j)}$ – максимальное значение детализирующего коэффициента на уровне j ; $\varepsilon_{j,k}$ – шумовой сдвиг.

Этап 4. Произвести обратное дискретное вейвлет-преобразование по аппроксимирующим и модифицированным детализирующим коэффициентам. В результате будет получен сигнал $g(x)$.

Этап 6. Оценка нелинейности полученной функции и сравнить ее с исходной.

Основой данного метода является модификация детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования с помощью формулы (8). Эта формула была составлена на основе следующих операций, которые влияют на нелинейность функции:

1) локальное усиление слабых компонент (если модуль коэффициента меньше заданного порога, то он заменяется на псевдослучайное значение с фиксированной амплитудой; это позволяет воздействовать только на слабые детали, сохраняя основную структуру функции);

2) неравномерность в спектре позволяет устранить симметрии или регулярности, увеличивая спектральную неопределенность функции;

3) добавление нормированного шума, внедрение псевдослучайных небольших колебаний в равные или нулевые коэффициенты для разрушения регулярной структуры спектра.

Рассмотрим основные компоненты формулы (8) подробнее. Ее структура напрямую вытекает из описанных принципов и реализует их в виде кусочно-заданной функции. Метод разделяет обработку сигнала на два случая в зависимости от их абсолютного значения относительно порога T .

В таблице 1 рассмотрены назначение и способ вычисления основных параметров формулы (8).

ТАБЛИЦА 1. Описание параметров формулы

TABLE 1. Description of Formula Parameters

Параметр	Назначение	Значение
Порог модификации (T)	Определение коэффициентов, которые имеют очень маленькие значения. Коэффициенты, которые меньше данного порога, будут модифицироваться.	$T = \tau * d_{\max}^{(j)}$, $\tau \in [0,05; 0,2]$
Знак исходного коэффициента, $\text{sign}(d_{j,k})$	Функция знака сохраняет направление исходного колебания, предотвращая разрушение фазовой структуры. Это важно для стабильности спектра при обратном преобразовании.	$\text{sign}(d_{j,k}) = \begin{cases} -1, & d_{j,k} < 0 \\ 1, & d_{j,k} \geq 0 \end{cases}$
Максимальное значение детализирующего коэффициента на уровне j , $d_{\max}^{(j)}$	Данное значение делает величину модификации пропорциональной масштабу уровня и гарантирует относительное соответствие измененных значений спектру данного уровня.	$d_{\max}^{(j)} = \max(d_0^{(j)}, d_1^{(j)}, \dots, d_n^{(j)})$
Масштабный коэффициент на уровне j , A_j	Масштабный коэффициент уровня определяет интенсивность модификации слабых детализирующих коэффициентов на каждом уровне вейвлет-декомпозиции.	Формула для масштабного коэффициента: $A_j = A_0 * e^{-a_j}$, где $A_0 \in [1,2; 1,5]$ – начальный уровень масштаба; $a \in [0,2; 0,4]$ – скорость затухания с глубиной уровня j .
Случайная величина для внесения нерегулярности в амплитуду, $\mu_{j,k}$	Данная величина вносит случайные колебания в амплитуду модифицированных коэффициентов. Это используется для того, чтобы избежать равномерности в спектре и разрушению линейной корреляции.	Значение данной величины является случайным числом из диапазона $[-\beta; \beta]$. Границы данного диапазона можно рассчитать по формуле: $\beta = 0,05 * d_{\max}^{(j)}$.
Шумовой сдвиг, $\varepsilon_{j,k}$	Данный шум добавляется к каждому модифицируемому коэффициенту. Это позволяет добавить дополнительную спектральную нестабильность и устранить симметричность спектра.	Шумовой сдвиг обычно вычисляется с помощью нормального распределения с нулевым средним: $\varepsilon_{j,k} \sim N(0, \sigma^2)$. При этом параметр этого распределения можно рассчитать по формуле: $\sigma = 0,05 * d_{\max}^{(j)}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе проводится проверка эффективности предложенного метода модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования для повышения спектральной нелинейности булевых функций. Анализ включает как пример, позволяющий пошагово проследить изменение структуры функции, так и серию массовых экспериментов на булевых функциях от 8, 10 и 12 переменных [3]. Все функции преобразовывались из булевой формы $f(x)$ в вещественную по

формуле (7). Затем применялось дискретное вейвлет-преобразование Хаара, модификация коэффициентов проводилась по предложенной в методе формуле, обратное преобразование и восстановление бинарного представления функции проводилось с использованием порога $\tau = 0$. Спектральная нелинейность оценивалась как для исходной, так и для модифицированной функции. Рассмотрим случайную булеву функцию от десяти переменных (9). Представим данную булеву функцию в вещественной форме (10).

$$f(x) = [0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, \dots, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1]. \quad (9)$$

$$f(x) = [1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, \dots, 1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, -1]. \quad (10)$$

Применим к ней преобразование Хаара. В результате данного преобразования вычисляются аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты по формулам (6).

Для примера проведем детализирующие коэффициенты на пятом уровне:

$$d_5 = [0,12; -0,31; 0,05; 1,42; \dots; -0,08; 0,21].$$

После расчета всех уровней коэффициентов модифицируем детализирующие коэффициенты по формуле (8).

Рассчитаем параметры модификации для детализирующих коэффициентов пятого уровня:

$$\max(|d_5|) = 1,42, \\ T_5 = 0,1 * \max(|d_5|) = 0,142.$$

Согласно полученному порогу необходимо модифицировать 20 коэффициентов. Определим параметры формулы для данного уровня:

$$A_5 = 1,3 * e^{-0,3*5} \approx 0,29, \\ \mu \in [-0,071; 0,071], \\ \varepsilon \sim N(0; 0,005041).$$

По полученным параметрам произведем расчет новых детализирующих коэффициентов, приведем расчеты некоторых из них.

Для нулевого коэффициента:

$$d_5[0] = 0,29 * 1 * (1 + 0,03) * 1,42 - 0,01 \approx 0,42,$$

где $\mu = 0,03$ и $\varepsilon = -0,01$.

Для второго коэффициента:

$$d_5[2] = 0,29 * 1 * (1 + 0,07) * 1,42 + 0,07 \approx 0,51,$$

где $\mu = 0,07$ и $\varepsilon = 0,07$.

Для тридцатого коэффициента:

$$d_5[30] = 0,29 * (-1) * (1 + 0,071) * 1,42 - 0,09 \approx -0,53,$$

где $\mu = 0,071$ и $\varepsilon = -0,09$.

После всех модификаций детализирующие коэффициенты 5 уровня имеют следующий вид:

$$d_5 = [0,42; -0,31; 0,51; 1,42; \dots; -0,53; 0,21].$$

Аналогичные модификации производятся со всеми детализирующими коэффициентами на всех уровнях разложения. После модификации всех коэффициентов применяем обратное вейвлет-преобразование и получаем следующий вектор значений:

$$g(x) = [0,91; -1,24; 1,37; -0,85; -0,72; 0,63; -1,08; 0,95, \dots].$$

Бинаризуем полученный вектор значений по формуле из этапа 5 метода модификации:

$$\widehat{f}(x) = [0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, \dots].$$

Произведем оценку нелинейности:

$$NL(f) = 368, \\ NL(\widehat{f}) = 436, \\ \Delta NL = 436 - 368 = 68.$$

Пример показал, что нелинейность функции в результате модификаций повысилась на 68 единиц.

Произведен эксперимент с помощью программных средств на 100 функциях при $n = 8, 10, 12$. Результаты эксперименты сведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты эксперимента

TABLE 2. Experimental Results

Размерность, N	Средняя исходная нелинейность	Средняя новая нелинейность	Среднее изменение нелинейности	Прирост нелинейности, %
8	100,3	112,1	11,8	11,8
10	372,6	438,9	66,3	17,8
12	1512,4	1756,2	243,8	16,1

При различных размерностях эксперимент демонстрирует прирост нелинейности на 12–18 %. Максимальный прирост нелинейности был при $n = 10$ и составил 17,8 %.

На рисунке 2 изображены графики нелинейности функций в зависимости от нелинейности. Графики демонстрируют, как предложенный метод приближает нелинейность к значениям бент-функции.

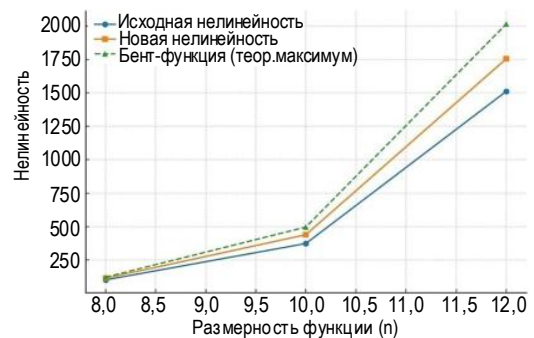


Рис. 2. Графическое представление приближения нелинейности к уровню бент-функции

Fig. 2. Comparison of Nonlinearity with Bent-Functions Level

ВЫВОД

Предложен метод повышения нелинейности булевых функций на основе адаптивной модификации детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения Хаара. Экспериментально подтверждено, что селективное усиление слабых высокочастотных компонент спектра (60–65 % коэффициентов) обеспечивает прирост нелинейности на 12–18 % для функций размерности $n = 8, 10, 12$. Метод позволяет приближать свойства функций к бент-характеристикам без сложных алгебраических конструкций и применим для автоматизиро-

ванной генерации криптографически стойких S-блоков и хеш-функций. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию параметров

модификации для больших n и анализ устойчивости к атакам.

Список источников

1. Carlet C. *Boolean Functions for Cryptography and Error Correcting Codes*. Cambridge University Press, 2007.
2. Токарева Н. Н. Бент-функции: результаты и приложения. Обзор работ // Прикладная дискретная математика. 2009. №1(3). С. 15–37. EDN:KGCEZH
3. Langevin P., Gillot V., Polujan A. Normality of 8-Bit Function // arXiv: 2504.21779. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2504.21779
4. Carlet C., Đurasevic M., Jakobovic D., Picek S., Mariot L. A Systematic Study on the Design of Odd-Sized Highly Nonlinear Boolean Functions via Evolutionary Algorithms // arXiv: 2504.17666. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2504.17666
5. Шибакин И.В., Левина А.Б. Алгоритм генерации бент-функций с помощью вейвлет-преобразования // Безопасность информационных технологий. 2025. Т. 32. № 4. С. 106–121. DOI:10.26583/bit.2025.4.08. EDN:EGISZJ
6. Carlet C., Đurasevic M., Jakobovic D., Mariot L., Picek S., Polujan A. On Counts and Densities of Homogeneous Bent Functions: An Evolutionary Approach // arXiv: 2511.12652. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2511.12652
7. Pandey S.K., Dass B.K. On Walsh Spectrum of Cryptographic Boolean Function // Defence Science Journal. 2017. Vol. 67. Iss. 5. PP. 536–541. DOI:10.14429/dsj.67.10638
8. Штарк Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 183 с.
9. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. Academic Press, 2008. 832 p.
10. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Пер. с англ. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
11. Демьянович Ю.К., Ходаковский В.А. Введение в теорию вейвлетов: курс лекций. СПб., 2007. 49 с.
12. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2008. 448 с. EDN:RAZCLT
13. Jiang N., Zhuo Z., Chen G., Wang L. The Walsh transform of a class of Boolean functions // Wuhan University Journal of Natural Sciences. 2021. Vol. 26. Iss. 6. PP. 453–458. DOI:10.1051/wujns/2021266453. EDN:EJIKQK

References


1. Carlet C. *Boolean Functions for Cryptography and Error Correcting Codes*. Cambridge University Press, 2007.
2. Tokareva N.N. Bent Functions: Results and Applications. A Survey. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*. 2009;1(3):15-37. (in Russ.) EDN:KGCEZH
3. Langevin P., Gillot V., Polujan A. Normality of 8-Bit Function. *arXiv: 2504.21779*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2504.21779
4. Carlet C., Đurasevic M., Jakobovic D., Picek S., Mariot L. A Systematic Study on the Design of Odd-Sized Highly Nonlinear Boolean Functions via Evolutionary Algorithms. *arXiv: 2504.17666*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2504.17666
5. Shibakin I.V., Levina A.B. Algorithm for generation of bent functions using wavelet transform. *IT Security (Russia)*. 2025;32(4):106–121. (in Russ.) DOI:10.26583/bit.2025.4.08. EDN:EGISZJ
6. Carlet C., Đurasevic M., Jakobovic D., Mariot L., Picek S., Polujan A. On Counts and Densities of Homogeneous Bent Functions: An Evolutionary Approach. *arXiv: 2511.12652*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2511.12652
7. Pandey S.K., Dass B.K. On Walsh Spectrum of Cryptographic Boolean Function. *Defence Science Journal*. 2017;67(5):536–541. DOI:10.14429/dsj.67.10638
8. Stark H.-G. *Wavelets and Signal Processing: An Application-Based Introduction*. Springer, 2005. 160 p.
9. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. Academic Press, 2008. 832 p.
10. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. SIAM, 1992. 376 p.
11. Dem'yanovich Yu.K., Khodakovskiy V.A. *Introduction to Wavelet Theory: Lecture Course*. St. Petersburg, 2007. 49 p. (in Russ.)
12. Smolentsev N.K. *Fundamentals of Wavelet Theory. Wavelets in MATLAB*. Moscow: DMK Press Publ.; 2008. 448 p. (in Russ.) EDN:RAZCLT
13. Jiang N., Zhuo Z., Chen G., Wang L. The Walsh transform of a class of Boolean functions. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 2021;26(6):453–458. DOI:10.1051/wujns/2021266453. EDN:EJIKQK

Статья поступила в редакцию 07.10.2025; одобрена после рецензирования 11.04.2026; принята к публикации 13.04.2026.


The article was submitted 07.10.2025; approved after reviewing 11.04.2026; accepted for publication 13.04.2026.

Информация об авторах:

ЛЕВИНА
Алла Борисовна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
 <https://orcid.org/0000-0003-4421-2411>

ПАНЧЕНКО
Никита Андреевич

аспирант кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
 <https://orcid.org/0009-0003-5850-7154>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

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 004.93'1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-17-25>

EDN:TPVPMW



Сокращение вычислительной сложности при совмещении одномерных сигналов с пропусками с помощью метода пирамид

Ринат Радмирович Диязитдинов, r.diyazitdinov@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В работе рассматривается проблема сокращения вычислительной сложности при совмещении сигналов, которая решается в различных прикладных задачах, таких как определение времени задержки в радио- и спутниковых каналах, навигационных, медицинских приложениях, эхолокации, определение характеристик повторяемости измерительных устройств и т. д. Особенностью рассматриваемой задачи является наличие пропусков в сигналах, что при использовании существующих методов и алгоритмов обработки ведет к увеличению времени обработки и недостаточной точности совмещения. Решение этой проблемы позволит снизить требования к вычислительному оборудованию (процессорам) и повысит оперативность принятия решений. В работе рассматривается задача оценивания смещений для сигналов, описывающих состояние железнодорожных путей, на примере параметра «ширина колеи».

Цель исследования: сокращение вычислительной сложности за счет уменьшения количества проверяемых гипотез (оцениваемых смещений) с помощью преобразования пирамиды для совмещения сигналов. Для этого были использованы **метод оптимизации** при поиске экстремума, соответствующего смещению на базе преобразования пирамиды, а также **модифицированный метод Lucas-Kanade**, учитывающий аддитивное и мультипликативное отклонение сигнала.

В ходе решения рассматриваемой проблемы была предложена метрика для сравнения сигналов с пропусками, был разработан двухэтапный алгоритм, в котором на первом этапе оценивается смещение с точностью до шага дискретизации на основе преобразования пирамиды, а на втором – смещение с субдискретной точностью на основе алгоритма Lucas-Kanade. Представлены рекомендации о количестве проверяемых смещений для определения глобального экстремума. Разработанный алгоритм по сравнению с существующим характеризуется уменьшением времени обработки в 10 раз с аналогичной точностью совмещения.

Новизна исследования заключается в модификации методов обработки на основе преобразования пирамиды для сигналов, содержащих пропуски.

Практическая значимость: полученные в работе результаты могут быть использованы в направлении сокращения вычислительной сложности при совмещении одномерных сигналов, а также для изображений, отличающихся масштабом и поворотом для систем технического зрения реального времени. Внедрение алгоритмов с низкой вычислительной сложностью в системы технического зрения, используемые для диагностики железнодорожных путей, позволят повысить оперативность принятия решений при обеспечении безопасности движения транспорта.

Ключевые слова: совмещение, вычислительная сложность, одномерный сигнал, метод пирамид, линеаризация параметров, аддитивное отклонение, мультипликативное отклонение, смещение


Ссылка для цитирования: Диязитдинов Р.Р. Сокращение вычислительной сложности при совмещении одномерных сигналов с пропусками с помощью метода пирамид // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 17–25. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-17-25. EDN:TPVPMW

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-17-25>

EDN:TPVPMW

Computation Cost Reduction for Superposition of One-Dimensional Signal with Gaps by Pyramid Method

 Rinat R. Diyazitdinov, r.diyazitdinov@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

Relevance. The article considers the problem of computational cost reduction for signal superposition. It is being solved in various applications, such as delay estimation of the radio and satellite channels, navigation, medicine task, echolocation, measuring devices repeatability. The feature of the researchable task is processing of signals with gaps. If the existing methods are applied to the signal processing, then it leads to time processing increasing or insufficient superposition accuracy. The solution will allow reducing the requirement of calculation equipment (processor) and increasing the decision-making efficiency.

Purpose of the work. Computational cost reduction by the decreasing of the number hypotheses (offsets) by pyramid representation for signal superposition.

Methods. An optimization method for extremum searching that corresponds to offset base on the pyramid representation, a modified Lucas-Kanade method for additive and multiplicative deviation of the signal.

Results. A metric for comparing the signal with gaps was proposed. The two-stage algorithm was developed. The first stage estimates the offsets with sampling step precision by pyramid representation. The second stage estimates the offset with subsampling precision by the Lucas-Kanade method. Recommendations of the hypotheses number (offsets) for global extremum determination are presented. The developed algorithm in comparison to the current algorithm allows decreasing the processing time by 10 times with similar precision.

The work's scientific novelty is the enhanced method for processing the signal with gaps by pyramid representation.

Practical significance. The result can be used to reduce the computational cost for one-dimensional signal processing. Also it can be used for image superposition with different scale and rotation for real-time machine vision systems.

Keywords: superposition, computational cost, one-dimensional signal, pyramid representation, parameter linearization, additive deviation, multiplicative deviation, offset

For citation: Diyazitdinov R.R. Computation Cost Reduction for Superposition of One-Dimensional Signal with Gaps by Pyramid Method. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):17–25. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-17-25. EDN:TPVPMW

Введение

Оценка временных или пространственных сдвигов для совмещения одномерных сигналов является важной прикладной задачей. Примерами подобных задач являются:

- оценка времени задержки в радио- и спутниковых каналах связи;
- эхолокация;
- определение угла направления сигнала в радиолокации;

– оценивание повторяемости измерительного устройства для подтверждения его метрологических характеристик и т. д.

В частности, в данной работе рассматривается задача совмещения сигналов, описывающих состояние железнодорожных путей, на примере параметра «ширина колеи». Способ измерения параметра «ширина колеи» [1] показан на рисунке 1. Этот параметр измеряется с помощью диагностических комплексов, установленных на железнодорожные вагоны (вагоны-путеизмерители). На со-

временных вагонах используются оптические датчики, позволяющие проводить измерения с высокой частотой. Однако эти датчики чувствительны к внешним условиям съемки. Неблагоприятные условия съемки (осадки, туман, пыль, грязь и т. д.) могут приводить к кратковременным пропускам измерений. Поэтому при обработке сигналов, в ходе которой проводится совмещение, необходимо учитывать эти пропуски.

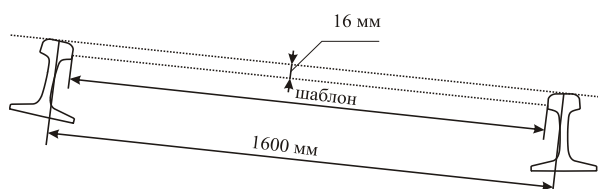


Рис. 1. Измерение параметра «ширина колеи»

Fig. 1. Measurement of the Parameter «Track Gauge»

Одной из важных характеристик при совмещении сигналов является время обработки, так как оно напрямую может влиять на время принятия решений, в особенности, если эти решения связаны с обеспечением безопасности (например, по совмещенным сигналам «ширина колеи» можно прогнозировать предотказное состояние железнодорожного пути).

Представленное исследование посвящено решению задачи уменьшения времени при совмещении сигналов за счет снижения вычислительной сложности алгоритма обработки. Решение этой задачи позволит снизить требования к вычислительному оборудованию (процессорам) и повысит оперативность принятия решений.

Обзор существующих работ

Развитие вычислительной техники привело к повышению быстродействия процессоров, однако, повысилась и частота съемки измерительных устройств (датчиков, видеокамер, сканеров, дальномеров, линейных камер и т. д.) Другими словами, несмотря на кратное увеличение быстродействия процессоров, объем обрабатываемых данных возрос также кратно. Поэтому уменьшение вычислительной сложности при совмещении сигналов как было, так и остается актуальной проблемой.

Ограничение аппаратных возможностей ведет к необходимости развития алгоритмических подходов, которые позволяют сократить количество вычислений, и тем самым обеспечивают снижение времени обработки. Вопросы совмещения одномерных сигналов близки к расчету сверток сигналов. Основная идея, закладываемая в алгоритмах этой группы, заключается в поиске наиболее похожих друг на друга фрагментов сигналов. Мерой схожести (метрикой) очень часто выступает сумма квадратов разностей отсчетов (евклидово расстояние) или коэффициент корреляции.

В обоих случаях при расчете метрики проводится вычисление суммы произведений отсчетов двух сигналов, которая определяет свертку сигналов:

$$z(i) = \sum_{j=1}^N g(j) \cdot f(i - j + 1), \quad (1)$$

где $z(i)$ – значение свертки для i -го отсчета, $i = 1 .. N + M - 1$; $g(i)$ – первый сигнал, $i = 1, 2, .., N$; $f(i)$ – второй сигнал, $i = 1, 2, .., M$, $f(i - j + 1) = 0$, если $i - j + 1 \leq 0$.

Решение задачи снижения вычислительной сложности известно. Оно базируется на расчете быстрого преобразования Фурье [2, 3] и позволяет вычислить свертку сигналов. Расчет свертки базируется на теореме, констатирующей, что Фурье-образ свертки двух функций равен произведению Фурье-образов функций, входящих в свертку.

Интересное решение, очень близкое к расчету сверток на базе Фурье-преобразования, было предложено в исследовании [4], идея которого заключается в применении полиномиальных базисов для декомпозиции импульсных характеристик КИХ-фильтров. Однако существенное снижение вычислительной сложности достигается при использовании осесимметричных импульсных характеристик (например, для функции Гаусса, вейвлета «мексиканская шляпа»).

Задача, которой посвящено данное исследование, отличается от рассматриваемых в ранее описанных работах тем, что совмещаемые сигналы имеют пропуски. Это приводит к тому, что свертку нельзя вычислить по всем отсчетам сигнала, соответственно прием с увеличением быстродействия за счет преобразования Фурье также нельзя использовать. Чтобы уйти от проблемы «пропусков в сигнале», можно его восстановить. Однако результат обработки может оказаться неудовлетворительным с точки зрения погрешности совмещения.

На рисунке 2а представлена обработка с учетом пропусков в сигнале (без использования преобразования Фурье). Из этого рисунка видно, что сигналы совместились с высокой точностью, несмотря на пропуски в сигнале $g(x)$. На рисунке 2b представлен сигнал, в котором пропуск был восстановлен с помощью линейной интерполяции. Этот сигнал не содержал пропусков, поэтому к нему применима методика совмещения путем полного перебора с использованием преобразования Фурье. Однако в результате обработки сигнал $f(x)$ совместился с сигналом $g(x)$ с высокой погрешностью, то есть визуально видно, что фрагмент сигнала $g(x)$ не похож на сигнал $f(x)$ (рисунок 2с).

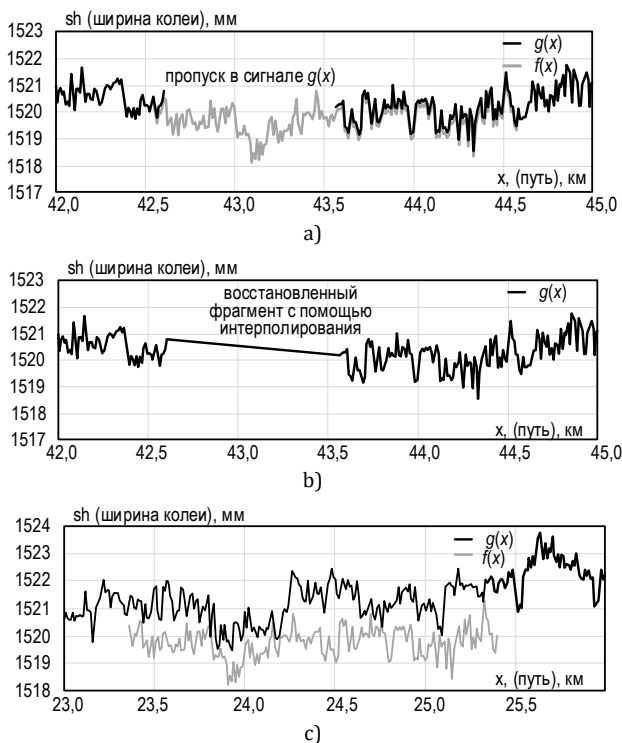


Рис. 2. Обработка сигналов с пропусками: совмещение без восстановления (а); восстановление с помощью линейной интерполяции (б); совмещение с восстановленным сигналом (с)

Fig. 2. Processing of the Signal with Gap: Superposition without Restoring (a); Restoring by Linear Interpolation (b); Superposition with Restored Signal (c)

Таким образом, при обработке сигналов с пропусками существует проблема низкой точности совмещения при использовании приемов с «быстрым» расчетом сверток, который требует восстановления данных. Поэтому для обеспечения требуемой точности совмещения более перспективным является обработка с учетом пропусков, но она характеризуется высокой вычислительной сложностью. Проблема обработки сигналов с пропусками решалась в работах [5, 6]. Перед исследователем стояла задача совмещения одномерных сигналов с пропусками с субдискретной точностью, при этом вопросы, связанные со сложностью обработки, в работах не рассматривались.

В результате был разработан алгоритм, который состоял из двух этапов:

- 1) «грубое» совмещение с точностью до шага дискретизации;
- 2) «уточняющее» совмещение с точностью 1/10 от шага дискретизации.

На обоих этапах использовался метод полного перебора, только на первом этапе устанавливается оценка смещения в диапазоне от 0 до N , где N – это количество отсчетов в анализируемом сигнале, а на втором этапе частота дискретизации увеличивается в 10 раз, и уточнение проводится в окрестности смещения, определенного на первом этапе.

Несомненным достоинством алгоритма [5] является простота и высокая точность совмещения. Однако высокая вычислительная сложность из-за использования принципов полного перебора является его недостатком. Для снижения вычислительной сложности был разработан алгоритм, в основе которого был заложен метод преобразования пирамиды.

Модель сигналов

В основе алгоритма совмещения лежит следующая математическая модель описания сигналов:

$$f(x) = s(x) + k(x), \quad (2)$$

$$g(x) = \lambda s(x + h) + \gamma + m(x), \quad (3)$$

где $f(x)$, $g(x)$ – наблюдаемые сигналы; x – аргумент (пространственная или временная координата); $k(x)$, $m(x)$ – аддитивный белый гауссов шум; λ , γ – мультипликативное и аддитивное отклонение сигнала; $s(x)$ – сигнал, описывающий физический процесс; h – смещение, которое необходимо оценить.

Использование именно такой модели связано с тем, что обрабатываемые сигналы имеют различия, которые могут быть интерпретированы как аддитивное и мультипликативное отклонение сигнала.

На рисунке 3 приведен пример совмещения одномерных сигналов, а на рисунке 4 – разности сигналов:

- без учета λ , γ (см. рисунок 4а), т. е. график разности $g(x) - f(x+h)$;
- с учетом только γ (см. рисунок 4б), т. е. график разности $g(x) - f(x+h) - \gamma$;
- с учетом λ , γ (см. рисунок 4с), т. е. график разности $g(x) - \lambda f(x+h) - \gamma$.

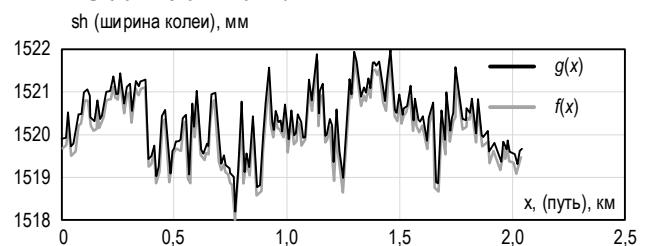


Рис. 3. Пример совмещения сигналов

Fig. 3. Signal Superposition Example

Как видно из приведенных рисунков, разница между сигналами минимальна с учетом λ и γ . На основе этого и многочисленных похожих экспериментов была выбрана математическая модель, учитывающая аддитивное и мультипликативное отклонение сигнала, описываемая выражениями (2, 3). Для учета пропусков в математической модели предлагается использовать векторы-маски, в которых значение «1» будет соответствовать наличию данных, а «0» – отсутствию. Сигналу $g(x)$ будет соответствовать вектор-маска $Mg(x)$, а сигналу $f(x)$ – вектор-маска $Mf(x)$.

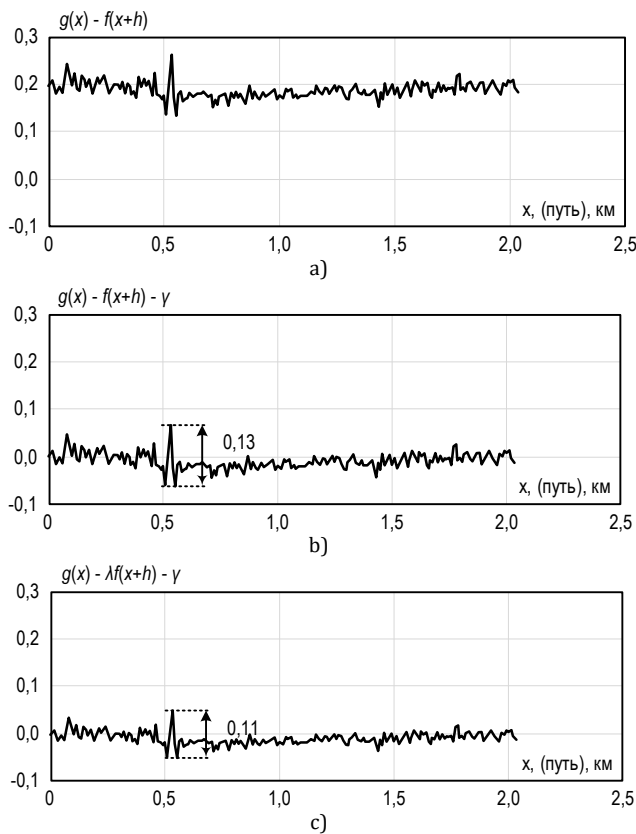


Рис. 4. Разность сигналов: а) без учета аддитивного и мультипликативного отклонения; б) с учетом только аддитивного отклонения; в) с учетом аддитивного и мультипликативного отклонения

Fig. 4. Signal Difference: a) without Additive and Multiplicative Deviation; b) Only with Additive Deviation; c) with Additive and Multiplicative Deviation

Разработанный алгоритм

Разработанный алгоритм, как и алгоритм, представленный в [5], состоит из двух основных этапов обработки – «грубого» и «уточняющего». На этапе «грубого» совмещения реализуется метод полного перебора, а для сокращения вычислений – метод

пирамиды. На втором этапе используется критерий максимума коэффициента корреляции (метрики для сравнения сигналов), потому что данный коэффициент инвариантен (не зависит) к параметрам λ и γ , что позволяет проверять гипотезы, связанные только со смещением (4, 5), где $R(h)$ – коэффициент корреляции между сигналом $f(x)$ и сигналом $g(x)$, смещенным на величину h ; x_i – это пространственная или временная координата, соответствующая i -му отсчету. Другими словами, в задаче оценивается только один параметр, а не три, так как при использовании « $\lambda f(x_i) + \gamma$ » вместо « $f(x_i)$ » в формуле (5) значение коэффициента корреляции останется тем же самым. Для учета пропусков в сигналах вместо $g(x_i)$ подставляется произведение $g(x_i) \cdot M g(x_i)$, а вместо $f(x_i) - f(x_i) \cdot M f(x_i)$. Таким образом, если координате « x_i » соответствует пропуск в сигнале $g(x)$ или $f(x)$, то значение такого слагаемого при суммировании в формуле (5) будет равно нулю.

Подобный способ учета пропусков определяет метрику, которая не является равнозначной заменой коэффициента корреляции (5). Поэтому возможность использования этой метрики для решения рассматриваемой задачи проверялась экспериментальным образом. В этом случае метрика для сравнения сигналов с пропусками запишется в виде (6), где $M c(x_i, h) = M f(x_i) \cdot M g(x_i + h)$ – вектор-маска, учитывающий пропуски в совмещаемых сигналах; $L(x_i, h) = \sum_{i=1}^M M c(x_i, h)$;

$$A_{g f M c} = \frac{\sum_{i=1}^M g(x_i + h) f(x_i) M c(x_i, h)}{L(x_i, h)}$$

$$A_{g M c} = \frac{\sum_{i=1}^M g(x_i + h) M c(x_i, h)}{L(x_i, h)}$$

$$A_{f M c} = \frac{\sum_{i=1}^M f(x_i) M c(x_i, h)}{L(x_i, h)}$$

$$\hat{h} = \underset{h}{\operatorname{argmax}}(R(h)), \tag{4}$$

$$R(h) = \frac{(\sum_{i=1}^M g(x_i + h) \cdot f(x_i))/M - ((\sum_{i=1}^M g(x_i + h))/M) \cdot ((\sum_{i=1}^M f(x_i))/M)}{((\sum_{i=1}^M g^2(x_i + h))/M - (\sum_{i=1}^M g(x_i + h)/M)^2)^{1/2} \cdot ((\sum_{i=1}^M f^2(x_i))/M - (\sum_{i=1}^M f(x_i)/M)^2)^{1/2}} \tag{5}$$

$$R(h) = \frac{A_{g f M c} - A_{g M c} \cdot A_{f M c}}{((\sum_{i=1}^M g^2(x_i + h) M c(x_i, h))/L(x_i, h) - (\sum_{i=1}^M g(x_i + h) M c(x_i, h)/L(x_i, h))^2)^{1/2}} \times \frac{1}{((\sum_{i=1}^M f^2(x_i) M c(x_i, h))/L(x_i, h) - (\sum_{i=1}^M f(x_i) M c(x_i, h)/L(x_i, h))^2)^{1/2}} \tag{6}$$

На этапе «уточняющего» совмещения используется критерий минимума евклидова расстояния. Метрикой в этом критерии является сумма квадратов разности отсчетов сигналов:

$$\hat{h} = \underset{h}{\operatorname{argmin}}(D(h)), \tag{7}$$

$$D(h) = \sum_{i=1}^M (g(x_i + h) - f(x_i))^2, \tag{8}$$

где $D(h)$ – евклидово расстояние между сигналом $f(x)$ и сигналом $g(x)$, смещенным на величину h .

С учетом пропусков:

$$D(h) = \sum_{i=1}^M (g(x_i + h) - f(x_i))^2 M g(x_i + h) M f(x_i). \quad (9)$$

Если рассматривать метрику (9), то возникает противоречивая ситуация. С одной стороны, чем меньше метрика, тем лучше совпадение, но с другой стороны, чем больше пропусков в сигналах, тем меньше будет метрика. Т. е., если два сигнала не имеют пересечений по областям определения, то метрика будет равняться нулю, и это будет соответствовать наиболее правдоподобному совмещению, что, конечно же, является неверным решением.

Особенность использования этой метрики заключается в том, что с ее помощью проводится уточнение смещения, и уточнение, как правило, не превышает одного-двух отсчетов. Поэтому ситуации, при которой два сигнала не будут иметь пересечений по областям определения (или же эта область существенно меняется), не возникает. Эта

особенность позволяет использовать метрику (9) для решения поставленной задачи.

Метрика (9) зависит от параметров λ и γ . Если их не учитывать, то это приводит к росту погрешности. В работе [7] представлено численное моделирование, подтверждающее это утверждение. Для учета аддитивного и мультипликативного отклонения сигнала используется метод линеаризации параметров (модифицированный метод Lucas-Kanade), который позволяет оценить одновременно три параметра путем решения системы линейных уравнений. Оценка смещения за счет решения системы уравнений является менее сложной с точки зрения вычислений, чем «полный перебор».

Вывод системы уравнений (10) подробно описан в работе [7], где $q(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$, $\mu = \lambda h$. С учетом пропусков получим (11), где $M_c(x_i, h) = M f(x_i) \cdot M f(x_{i+1}) \cdot M g(x_i + h)$ – вектор-маска, учитывающий пропуски в совмещаемых сигналах.

Решение системы уравнений позволяет вычислить искомое смещение h с субдискретной точностью.

$$\begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^M f(x_i) q(x_i) + \mu \sum_{i=1}^M q^2(x_i) + \gamma \sum_{i=1}^M q(x_i) = \sum_{i=1}^M g(x_i) q(x_i) \\ \lambda \sum_{i=1}^M f^2(x_i) + \mu \sum_{i=1}^M f(x_i) q(x_i) + \gamma \sum_{i=1}^M f(x_i) = \sum_{i=1}^M g(x_i) f(x_i) \\ \lambda \sum_{i=1}^M f(x_i) + \mu \sum_{i=1}^M q(x_i) + \gamma M = \sum_{i=1}^M g(x_i) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^M f(x_i) q(x_i) M_c(x_i, h) + \mu \sum_{i=1}^M q^2(x_i) M_c(x_i, h) + \gamma \sum_{i=1}^M q(x_i) M_c(x_i, h) = \sum_{i=1}^M g(x_i) q(x_i) M_c(x_i, h) \\ \lambda \sum_{i=1}^M f(x_i) q(x_i) M_c(x_i, h) + \mu \sum_{i=1}^M q^2(x_i) M_c(x_i, h) + \gamma \sum_{i=1}^M q(x_i) M_c(x_i, h) = \sum_{i=1}^M g(x_i) q(x_i) M_c(x_i, h) \\ \lambda \sum_{i=1}^M f(x_i) M_c(x_i, h) + \mu \sum_{i=1}^M q(x_i) M_c(x_i, h) + \gamma \sum_{i=1}^M M_c(x_i, h) = \sum_{i=1}^M g(x_i) M_c(x_i, h) \end{cases} \quad (11)$$

Особенности этапа обработки «грубого» совмещения

Ниже рассмотрены особенности обработки «грубого» совмещения.

Пусть сигнал $f(x)$ содержит M отсчетов, а сигнал $g(x)$ – N отсчетов.

Если использовать метод полного перебора, то необходимо проверить « $N - M + 1$ » вариантов смещений. Если полагать, что $N \gg M$, то $N - M + 1 \approx N$.

При использовании метода пирамид количество отсчетов зависит от «номера пирамиды» и будет уменьшаться в 2^K раз, где K – номер пирамиды. Соответственно количество смещений, которое необходимо проверить, будет определяться как $\frac{N}{2^K}$. Такой подход позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность.

Дальнейшая обработка, как правило, проводится следующим образом [8–10]: оценив смещение h_t по сигналам t -й пирамиды, происходит переход на

« $t-1$ »-ю пирамиду. Относительно смещения $2h_t$ (множитель 2 учитывает, что количество отсчетов на « $t-1$ »-й пирамиде в 2 раза больше, чем на t -й пирамиде) уточняется смещение – определяется $2h_{t-1}$. Этот процесс повторяется, пока не будет достигнута пирамида с номером $t = 0$, соответствующая исходным данным.

Однако такая схема обработки имеет недостаток: если при обработке t -й пирамиды погрешность оценки смещения больше, чем $|\hat{h} - 2^t \cdot h_t|$, то с высокой вероятностью смещение, оцененное с помощью пирамид, не будет соответствовать смещению \hat{h} (смещение, соответствующее максимальному значению коэффициента корреляции согласно формуле (4)). Поэтому в разработанном алгоритме предложено проверять несколько возможных смещений, а не одно. При этом количество смещений будет зависеть от номера пирамиды. Для обозначения количества проверяемых смещений введена переменная s_t , где индекс t обозначает номер пирамиды. Смещения при обработке t -го номера пирамиды определяются по s_t максимальным коэффициентам корреляции.

Вопрос выбора максимального номера пирамиды K , величин s_t , $t = 0 \dots K$ является оптимизационным, т. е. зависит от свойств сигнала и может быть решен экспертным способом (определил разработчик алгоритма, исходя из своих критериев), либо по результатам оптимизационных экспериментов.

При разработке алгоритма экспертным способом были выбраны:

– количество отсчетов в сигнале $f(x)$, $M = 2048$ отсчетов;

– максимальный номер пирамиды $K = 6$, т. е. количество отсчетов на 6-й пирамиде соответствовало $\frac{M}{2^K} = \frac{2048}{2^6} = 32$ отсчета.

Экспериментальным образом устанавливалось количество проверяемых смещений s_t для t -й пирамиды.

Методика выбора s_t состоит из следующих шагов:

1) определение сигналов $f(x)$ и $g(x)$, M , N – количество отсчетов в сигнале $f(x)$ и $g(x)$;

2) вычисление смещения \hat{h} по алгоритму полного перебора; это значение используется в качестве эталонного (целевого значения, глобального оптимума);

3) формирование пирамид из сигналов $f(x)$ и $g(x)$;

4) выбор максимальных значений s_t , $t = 0 \dots K$, например, $K = 6$, $t = K$, $s_6 = \frac{N}{2^6}$, $t = K-1 = 5$, $s_5 = \frac{N}{2^5}$ и т. д.

5) выбор максимального номера пирамиды $t = K$;

6) определение значения s_t методом деления пополам (дихотомии или двоичного поиска):

– определение минимально и максимально возможного значения для s_t : $\min_v = 1$, $\max_v = \frac{N}{2^t}$;

– этап деления пополам: $\text{mid} = 0,5 \cdot (\min_v + \max_v)$;

– определение окончания процедуры оптимизации: если $|\max_v - \text{mid}| < 1$, то переход к п. 7;

– обновление s_t : $s_t = \text{mid}$;

– формирование вектора со значениями (s_0, s_1, \dots, s_K) ;

– совмещение согласно методу пирамид для (s_0, s_1, \dots, s_K) ; в результате оценивается смещение h_0 ;

– обновление параметров \min_v и \max_v :

если $h_0 = \hat{h}$, то $\max_v = \text{mid}$,

если $h_0 \neq \hat{h}$, то $\min_v = \text{mid}$;

7) выбор следующего номера пирамиды: $t = t - 1$;

8) определение окончания процедуры оптимизации: если $t \neq 0$, то переход к п. 6;

9) вывод на печать вектора (s_0, s_1, \dots, s_K) .

Описанная процедура оптимизации проводилась 1000 раз для различных сигналов $f(x)$ и $g(x)$, $N = 100\,000$ отсчетов, и из всех вариантов были выбраны максимально возможные значения (s_0, s_1, \dots, s_K) . В таблице 1 представлены полученные результаты.

ТАБЛИЦА 1. Соответствие между количеством проверяемых смещений и номером пирамиды

TABLE 1. Mapping between Number of the Tested Offset and Pyramid's Number

№	t ,	N	$N/2^t$	s_t	$\frac{N/2^t}{s_t \times 10^{-3}}$
1	6	100 000	1 563	10	6,40
2	5		3 125	7	2,20
3	4		6 250	4	0,64
4	3		12 500	1	0,08
5	2		25 000	1	0,04
6	1		50 000	1	0,02
7	0		100 000	1	0,01

Условные обозначение: t – номер пирамиды; N – количество отсчетов в сигнале $g(x)$; $N/2^t$ – количество отсчетов в пирамиде $g(x)$ с номером t

Из таблицы 1 видно, что с ростом номера пирамиды необходимо проверять большее количество смещений, чтобы обеспечить глобальный оптимум (смещение с максимальным коэффициентом корреляции при совмещении исходных сигналов). Однако, начиная с некоторого номера пирамиды (для сигналов, используемых в исследовании $t = 3$), достаточно проверять только одно смещение. Данную методику определения параметров алгоритма, основанного на методе пирамид, можно использовать при решении похожих задач.

Экспериментальная проверка

Для экспериментальной проверки использовались сигналы, описывающие пространственные параметры железнодорожных путей, в частности, обрабатывался параметр «ширина колеи» [1]. Алгоритм был проверен на 5 участках железнодорожного пути с длиной не менее 10 км, при этом

на каждом участке проводилось не менее 8 измерительных сессий. Точность совмещения определялась как среднеквадратичное значение разности между сигналами. В таблице 2 представлены результаты точности измерения.

ТАБЛИЦА 2. Точность измерения параметра «ширина колеи»
TABLE 2. Measurement Accuracy for Parameter «Track Gauge»

№ участка	Максимальное значение среднеквадратичного значения разности, мм	
	Существующий [5]	Разработанный
1	0,071	0,072
2	0,072	0,071
3	0,073	0,073
4	0,071	0,070
5	0,071	0,073

Как видно из таблицы 2, точность совмещения у разработанного алгоритма практически такая же, как и у существующего алгоритма [5].

На рисунке 5 показан один из примеров совмещения сигналов, один из которых содержит пропуски, согласно разработанному алгоритму. Его основное достоинство заключается в уменьшении времени обработки – приблизительно в 10 раз [5]. Например, при совмещении сигналов с количеством отсчетов порядка 100 000, время обработки снизилось с 30,2 до 2,8 с (примечание: сравнение проводилось в программной среде Octave на персональном компьютере с процессором i7-3770).

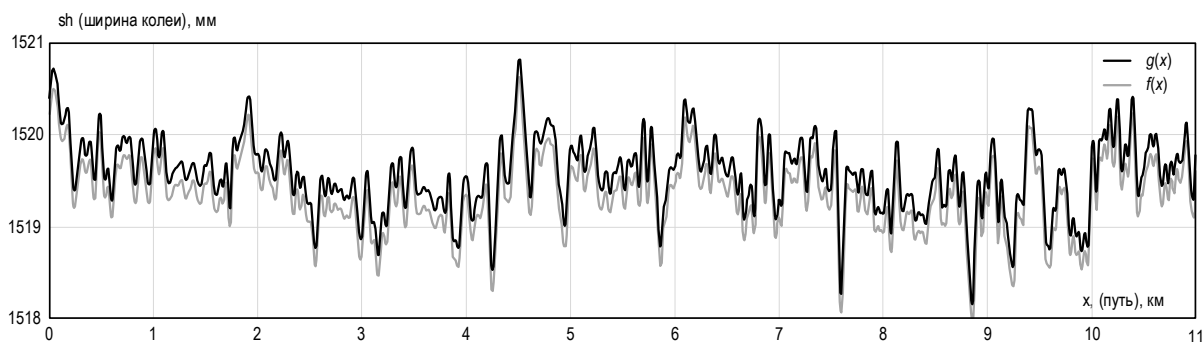


Рис. 5. Пример совмещения сигналов

Fig. 5. Signal Superposition Example

Вывод

В работе представлен алгоритм совмещения одномерных сигналов с пропусками, позволяющий снизить вычислительную сложность обработки. Алгоритм состоит из двух этапов обработки, каждый из которых заменяет процедуру оценки смещений полным перебором на менее сложную обработку. Экспериментальная проверка показала 10-кратное уменьшение времени обработки. При использовании метода пирамиды предложена мо-

дернизация, заключающаяся в проверке не одного, а нескольких возможных смещений, чтобы обеспечить оценку по глобальному экстремуму. Для определения количества проверяемых смещений в зависимости от номера пирамиды была разработана соответствующая методика. Дальнейшее развитие алгоритма совмещения будет вестись в направлении совмещения изображений, отличающихся масштабом и поворотом для систем технического зрения реального времени.

Список источников

1. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближение строений. М.: Стандартинформ, 2014.
2. Мясников Е.В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 3. С. 77–82. EDN:IUDQGV
3. Чкан А.В. Повышение реальной производительности РВС при решении задач цифровой обработки изображений с использованием быстрого преобразования Фурье // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 7(217). С. 152–163. DOI:10.18522/2311-3103-2020-7-152-163. EDN:VRSEWY
4. Мясников В.В., Глумов Н.И., Сергеев В.В. Параллельно-рекурсивные методы локального описания цифровых изображений: учебное пособие. Самара: Самарский университет, 2023. 100 с.
5. Кузьмин С.В. Инвариантное к масштабу определение задержек между двумя одномерными цифровыми сигналами // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9. № 2. С. 7–10. EDN:NUMYPF
6. Кузьмин С.В. Нормированная корреляционная функция для анализа сигналов с разной частотой дискретизации // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9. № 4. С. 19–23. EDN:OWQWDH

7. Диязитдинов Р.Р. Усовершенствование алгоритма Лукаса-Канаде для совмещения цифровых видеосигналов на фоне аддитивных и мультипликативных помех // XI Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2019» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 21–25 октября 2019). СПб.: Университет ИТМО. С. 194–196. EDN:VZGJXY
8. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 2. С. 343–350. DOI:10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350. EDN:SFAZFL
9. Смирнов С.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д., Муравьев В.С. Разработка и оптимизация алгоритма слежения за транспортным средством в видеопотоке на основе пирамидального метода Лукаса-Канаде // Вестник кибернетики. 2020. № 2(38). С. 58–67. DOI:10.34822/1999-7604-2020-2-58-67. EDN:YNCLHD
10. Горбачев Р.А., Зарипов М.Н., Шишков Д.Л. Интеллектуальная система технического зрения для обнаружения препятствий и предсказания поведения движущихся объектов на железнодорожных путях // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1(225). С. 256–268. DOI:10.18522/2311-3103-2022-1-256-268. EDN:VCMTHQ

References


1. GOST 9238-2013. *Construction and rolling stock clearance diagrams*. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (in Russ.)
2. Myasnikov E.V. Determination of parameters of geometric transformations for combining portrait images. *Computer Optics*. 2007;31(3):77–82. (in Russ.) EDN:IUDQGV
3. Chkan A.V. Improving Real Performance of RCS when solving digital image processing tasks using fast fourier transform. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2020;7(217):152–163. (in Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2020-7-152-163. EDN:VRSEWY
4. Myasnikov V.V., Glumov N.I., Sergeev V.V. *Parallel-Recursive Methods of Local Description of Digital Images*. Samara: Samara University Publ.; 2023. 100 p. (in Russ.)
5. Kuzmin S.V. Scale-Invariant Delay Estimation Between Two One-Dimensional Digital Signals. *Infokommunikacionnye Tehnologii*. 2011;9(2):7–10. (in Russ.) EDN:NUMYPF
6. Kuzmin S.V. Normalized Correlation Function for Signal Analysis with Different Sample Rates. *Infokommunikacionnye Tehnologii*. 2011;9(4):19–23. (in Russ.) EDN:OWQWDH
7. Diyazitdinov R.R. Improving the Lucas-Kanade Algorithm for Combining Digital Video Signals Against the Background of Additive and Multiplicative Interference. *Proceedings of the XIth International Conference on Fundamental Problems of Optics – 2019, 21–25 October 2019, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: ITMO University Publ. p.194-196. (in Russ.) EDN:VZGJXY
8. Bessmeltsev V., Bulushev E. Fast Image Registration Algorithm for Automated Inspection of Laser Micromachining. *Computer Optics*. 2014;38(2):343–350. (in Russ.) DOI:10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350. EDN:SFAZFL
9. Smirnov S.A., Babayan P.V., Ershov M.D., Muraviev V.S. Development and Optimization of Algorithm for Vehicle Tracking on Video Using Lucas-Kanade Method with Pyramids. *Proceedings in Cybernetics*. 2020;2(38):58–67. (in Russ.) DOI:10.34822/1999-7604-2020-2-58-67. EDN:YNCLHD
10. Gorbachev R.A., Zaripov M.N., Shishkov D.L. An Intelligent System of Technical Vision for Detecting Obstacles and Predicting the Behavior of Moving Objects on Railway Tracks. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022;1(225):256–268. (in Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2022-1-256-268. EDN:VCMTHQ

Статья поступила в редакцию 22.12.2025; одобрена после рецензирования 29.04.2026; принята к публикации 04.05.2026.

The article was submitted 22.12.2025; approved after reviewing 29.04.2026; accepted for publication 04.05.2026.

Информация об авторе:

ДИЯЗИТДИНОВ
Ринат Радмирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0000-0001-6360-0351>

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-2026-12-3-26-34>

EDN:ZPZGVL



Прием и обработка сигналов в перспективных образцах навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС

- Алексей Васильевич Козлов, vka@mil.ru
- Александр Михайлович Петушков, vka@mil.ru
- Евгений Александрович Саковский✉, vka@mil.ru
- Дмитрий Анатольевич Соловьёв, vka@mil.ru

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки программно-определяемых приемников, способных динамически адаптироваться к изменениям в навигационных системах без модификации аппаратной части, поскольку традиционные приемники на основе жестко заданных алгоритмов обладают ограниченной адаптивностью к изменениям структуры сигналов и появлению новых сервисов.

Цель исследований: разработка алгоритма совместной обработки навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением, обеспечивающего универсальность программного приемника в условиях разнообразия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. **Научная задача** заключается в экспериментальной верификации алгоритмов цифровой обработки сигналов, позволяющих унифицировать обработку различных типов навигационных сигналов в единой программной среде.

Методы исследования: алгоритмическое моделирование, корреляционная обработка на основе быстрого преобразования Фурье, а также экспериментальная отработка на макете программного приемника.

Результаты: представлены возможные подходы к совместной обработке сложных сигналов с частотным и кодовым разделением; изложена концепция развития технологии построения навигационной аппаратуры потребителя; приведены результаты экспериментальной отработки алгоритма приема и обработки навигационных сигналов с кодовым разделением; предложен алгоритм совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением в едином программном приемнике. **Научная новизна** работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности унификации алгоритмов приема для сигналов с частотным и кодовым разделением в рамках единого вычислительного ядра.

Теоретическая значимость: получение нового знания о принципах построения универсальных алгоритмов обработки навигационных сигналов.






Практическая значимость: предложенный алгоритм позволяет создавать универсальные навигационные приемники с программной адаптацией к изменениям в глобальных навигационных спутниковых системах, что снижает затраты на модернизацию аппаратуры, а его реализация на базе высокопроизводительных процессоров позволит обеспечить обработку в реальном масштабе времени в перспективных образцах аппаратуры.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, навигационные сигналы, навигационная аппаратура потребителей, навигационный приемник, программный приемник, система ГЛОНАСС, глобальные навигационные спутниковые системы

Ссылка для цитирования: Козлов А.В., Петушков А.М., Саковский Е.А., Соловьёв Д.А. Прием и обработка сигналов в перспективных образцах навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 26–34. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34. EDN:ZPZGVL

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34>
EDN:ZPZGVL

Reception and Processing of Signals in Prospective Models of User Navigation Equipment for GLONASS

 **Aleksey V. Kozlov**, vka@mil.ru
 **Aleksandr M. Petushkov**, vka@mil.ru
 **Evgeniy A. Sakovsky** , vka@mil.ru
 **Dmitriy A. Solovyov**, vka@mil.ru

Military Aerospace Academy,
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Annotation

Relevance is driven by the necessity to develop software-defined receivers capable of dynamically adapting to changes in navigation systems without hardware modifications, as traditional hardware-defined receivers based on fixed signal processing algorithms possess limited adaptability to evolving signal structures and new services. **The research aim** is to develop an algorithm for the joint processing of navigation signals with frequency and code division multiple access, ensuring the universality of a software receiver under diverse Global Navigation Satellite System signal conditions.

The scientific objective is the experimental verification of digital signal processing algorithms that facilitate unified processing of multiple navigation signal types within a single software environment.

Methods employed in the study include algorithmic modeling, correlation processing based on the Fast Fourier Transform, and experimental validation using a software receiver prototype.

Results are as follows: possible approaches for joint processing of complex signals with frequency and code division in a GLONASS software receiver are presented; a concept for the development of user navigation equipment technology is outlined; experimental results for the reception and processing algorithm of code-division signals are provided; an algorithm for joint processing of frequency-division and code-division signals in a unified software receiver is proposed.

The scientific novelty lies in the substantiation and experimental confirmation of the feasibility of unifying reception algorithms for signals with frequency and code division multiple access within a unified computational core.

Theoretical significance lies in obtaining new knowledge about the principles of constructing universal processing algorithms for navigation signals.

The practical significance is that the proposed algorithm enables the development of universal navigation receivers with software-defined adaptability to Global Navigation Satellite Systems updates, significantly reducing hardware modernization costs. Its implementation on high-performance processors will provide real-time processing capabilities in prospective receiver designs.

Keywords: digital signal processing, navigation signals, user navigation equipment, navigation receiver, software receiver, the global navigation satellite system GLONASS, Global Navigation Satellite Systems

For citation: Kozlov A.V., Petushkov A.M., Sakovsky E.A., Solovyov D.A. Reception and Processing of Signals in Prospective Models of User Navigation Equipment for GLONASS. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):26–34. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34. EDN:ZPZGVL

Введение

Современные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou, характеризуются усложнением

структуры навигационных сигналов. Внедрение новых сигналов системы ГЛОНАСС (L1C, L3OC и др.), а также развитие систем функциональных дополнений, требуют от навигационной аппаратуры

потребителей (НАП) повышенной адаптивности. Традиционные аналого-цифровые архитектуры не обеспечивают гибкости при смене форматов сигналов, что делает переход к программно-определяемым приемникам технологической необходимостью. Ключевым преимуществом программно-определяемых приемников является возможность адаптации к изменениям стандартов исключительно за счет обновления специального программного обеспечения (СПО), без замены аппаратной платформы.

Концепция развития навигационных приемников

При создании современных НАП используется принцип смешанной аппаратно-программной реализации алгоритмов обработки сигналов. При этом операции, требующие высокого быстродействия, такие как согласованная фильтрация, селекция сигналов, дискриминирование, поиск, обнаружение и т. д., выполняются аппаратными средствами (аналоговыми или цифровыми), а программная часть обработки включает в себя выполнение сравнительно медленных операций по статистической обработке данных, поступающих из аппаратной части, как отмечено в [1]. Основным

элементом в навигационном приемнике является аппаратно реализованный коррелятор, логика работы которого неизменна, что ограничивает адаптивность НАП и не позволяет ей функционировать при появлении новых сигналов в ГНСС.

Производительность современных средств обработки сигналов позволяет осуществлять цифровую обработку, близкую к реальному масштабу времени не только на промежуточной частоте, но и на частоте несущего колебания, что, в свою очередь, позволяет реализовывать оптимальную обработку сигнала программным способом. Это определяет ключевое направление развития НАП ГНСС – переход от аппаратной к программной реализации алгоритмов оптимальной обработки сигналов, что является общим трендом в развитии приемной аппаратуры (подробно рассмотрено в [2]). При этом экспериментальная отработка алгоритмов на ранних этапах исследования может выполняться на доступной элементной базе предыдущих поколений в режиме постобработки, что позволяет верифицировать корректность предлагаемых решений до их реализации на более производительных платформах. Концепция развития навигационных приемников схематично отражена на рисунке 1.

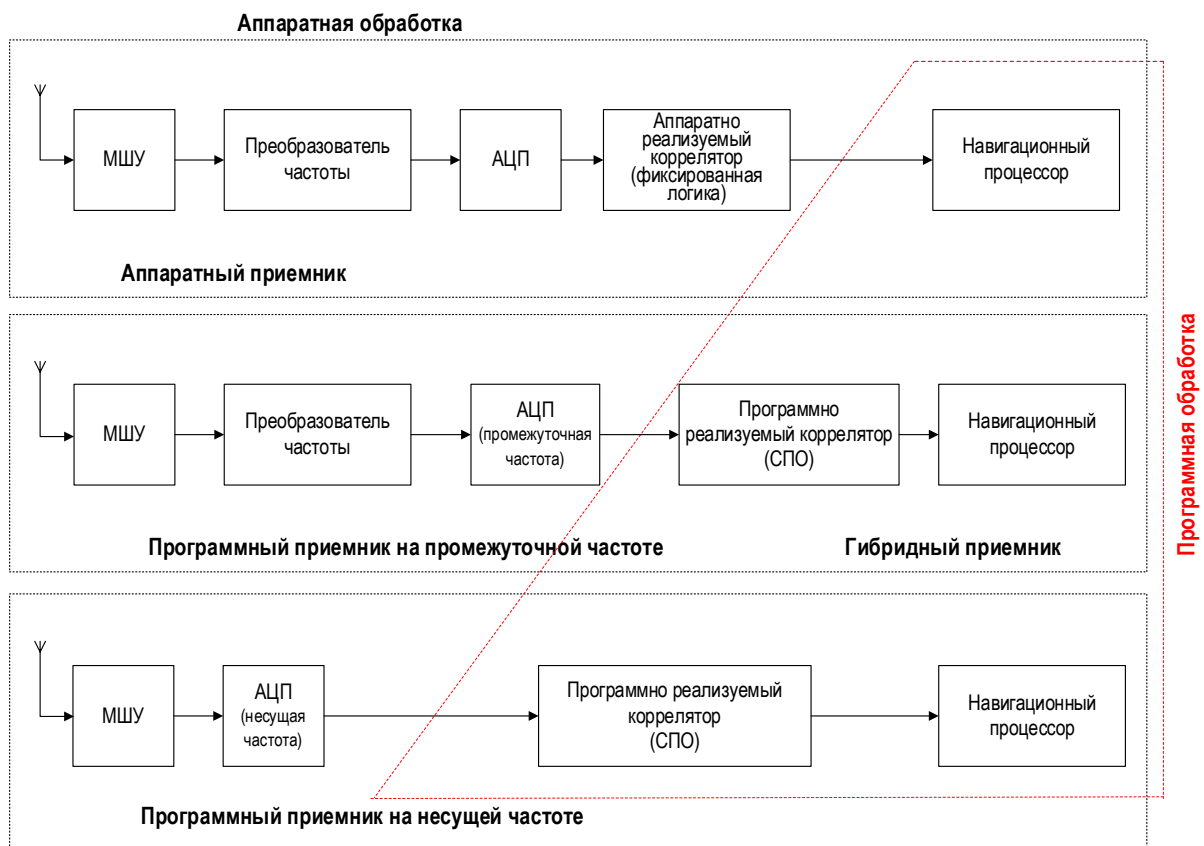


Рис. 1. Концепция развития навигационных приемников

Fig. 1. The Evolution of GNSS Receiver Technology

Под программным понимается приемник, в котором после аналого-цифрового преобразования (АЦП) или понижения частоты и АЦП обработка навигационных сигналов осуществляется программно. Развитие технологии программного приема навигационных сигналов стало возможным после появления высокопроизводительных сигнальных процессоров, реализующих корреляционную обработку сигнала в масштабе времени, близком к реальному.

Одним из основных отличий программного приемника спутниковых навигационных систем является наличие в тракте промежуточной частоты многоуровневого АЦП. Дальнейшая первичная обработка оцифрованного сигнала производится в сигнальном процессоре [1, 3]. Главными преимуществами программной стратегии обработки навигационных сигналов являются снижение аппаратных затрат и себестоимости, гибкость к изменениям в структуре существующих сигналов, появлению новых сигналов и к интеграции новых навигационных систем, а также возможность повышения помехоустойчивости за счет применения программных методов пред- и посткорреляционной обработки, реализация которых в специализированных интегральных схемах сопряжена со значительно большей сложностью и стоимостью. К числу достоинств рассматриваемого подхода также относится возможность реализации разработанных алгоритмов на различных типах вычислительных средств, используемых в современном приборостроении, без изменения архитектуры приемника [1–4]. Кроме того, к числу основных преимуществ программного приема следует отнести уменьшение стоимости модернизации при появлении новых навигационных систем и сигналов, а также – высокую стабильность характеристик приемника [1–4].

К настоящему времени известны программные реализации преобразователей частоты во временной и частотной областях, корреляторов, обнаружителей и схем слежения за параметрами спутниковых сигналов с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Теоретические основы этих методов подробно изложены в [3], практические аспекты реализации отражены в патентной литературе [5]. Помимо этого, разработаны измерители частоты на основе БПФ, а также детекторы и подавители помех [2, 4].

Анализ авторитетных источников, посвященных программной реализации навигационных приемников [1–4], указывает на явные преимущества по сравнению с традиционной схемой построения: новая элементная база, ускорение поиска сигналов за счет использования БПФ, малое энергопотребление, а также возможность адаптации к новым сигналам без изменения аппаратной части.

Однако цифровое понижение частоты входного сигнала остается одной из наиболее вычислительно затратных операций в программном приемнике.

Программные приемники ГНСС реализуют широкий спектр методов цифровой обработки сигналов [2–4], включая:

- свертку сигналов в частотной области;
- применение узкостробирующих корреляторов;
- ускоренный поиск на основе критерия обнаружения Вальда;
- бескодовый прием на закрытых частотах;
- программно-реализуемые кольца слежения за частотой, задержкой и фазой;
- отслеживание задержки через интегральный доплер;
- применение фильтра Калмана для решения навигационной задачи.

Основной проблемой при реализации технологии программного приема по-прежнему остаются высокие требования к вычислительной мощности процессоров и пропускной способности шин для реализации параллельных вычислений в реальном масштабе времени, с чем успешно справляются сигнальные процессоры.

Прием и обработка сигналов с частотным и кодовым разделением

Ключевым преимуществом программного построения НАП является возможность реализации единого вычислительного ядра для совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением. Основной научно-технической задачей при этом становится не реализация базового алгоритма корреляции, а минимизация вычислительных затрат при параллельной обработке разнородных сигналов. Предлагаемое решение заключается в модификации классического алгоритма быстрой свертки [3] за счет параметризуемого формирования опорных сигналов и повторного использования их спектров. Это позволяет для набора сигналов с разными несущими частотами и кодовыми последовательностями однократно вычислять и хранить спектры опорных воздействий, многократно применяя их в итерациях поиска по разным спутникам и предполагаемым доплеровским сдвигам частоты. Данный подход исключает дублирование наиболее ресурсоемких операций при обработке сигналов ГЛОНАСС ($L1$, $L2$ – с частотным разделением) и новых сигналов с кодовым разделением ($L1$, $L2$, $L3$). На рисунке 2 представлена блок-схема реализации модифицированного алгоритма поиска и обнаружения навигационного сигнала по задержке дальномерного кода при некогерентном накоплении сигнала (алгоритм).

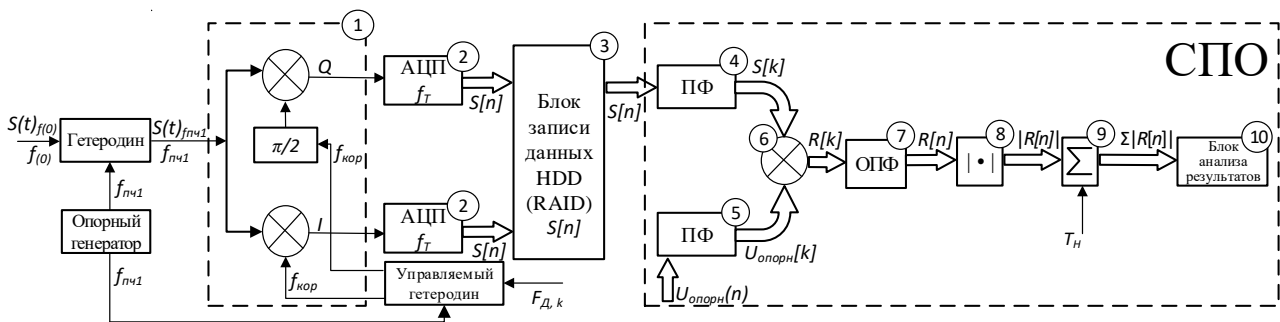


Рис. 2. Блок-схема реализации модифицированного алгоритма поиска и обнаружения навигационного сигнала по задержке дальномерного кода при некогерентном накоплении сигнала

Fig. 2. Block Diagram of the Modified Algorithm for Navigation Signal Search and Detection Based on PRN Code Delay Estimation with Non-Coherent Integration

На представленной схеме (см. рисунок 2) использованы следующие обозначения:

$f_{(0)}$ – несущая частота принимаемого навигационного сигнала;

$S(t)_{f(0)}$ – входной сигнал на несущей частоте;

$S(t)_{f_{пч1}}$ – входной сигнал на промежуточной частоте (ПЧ);

I – синфазная составляющая комплексной огибающей сигнала;

Q – квадратурная составляющая, соответствующая проекции сигнала на ортогональную ось, сдвинутую на $\pi/2$;

$f_{пч1}$ – частота опорного генератора;

f_T – частота дискретизации АЦП;

$S[n] = S(n/f_T)$ – отсчеты оцифрованного сигнала;

$U_{опорн}(n)$ – опорная кодовая последовательность (в отсчетах);

$f_{кор}$ – номинальное значение ПЧ в цифровой модели; $F_{д,k}$ – k -я проверяемая величина доплеровского сдвига частоты космического аппарата и потребителя; суммарная частота $f_{кор}$ для компенсации задается как $(f_{пч1} + F_{д,k})$;

$S[k]$ – спектр принятого сигнала;

$U_{опорн}[k]$ – спектр опорного сигнала;

$R[k]$ – комплексно-сопряженное перемножение спектров $(S[k], U_{опорн}[k])$;

$R[n]$ – корреляционная функция;

$|R[n]|$ – модуль корреляционного отклика;

T_n – интервал времени некогерентного накопления модулей корреляционного отклика.

Алгоритм включает 10 блоков.

В блоках 1–3 алгоритма выполняется квадратурное преобразование и оцифровка: навигационный сигнал на несущей частоте $f_{(0)}$ поступает на антенну и далее – в аналоговый тракт. С выхода аналогового тракта входной сигнал $S(t)_{f_{пч1}}$ поступает в квадратурный приемник (блок 1). Управляемый гетеродин формирует опорное колебание, которое разветвляется на две ветви: для синфазного (I) и квадратурного (Q) каналов. Для формирования квадратуры (Q) во второй ветви используется фазовращатель на $\pi/2$ (90°). Полученные квадратурные компоненты оцифровываются АЦП (блок 2) с ча-

стойкой f_T , формируя последовательность $S[n] = S(n/f_T)$, которая накапливается в запоминающем устройстве (блок 3) для последующей обработки.

В блоках 4–10 алгоритма осуществляется частотная корреляционная обработка с предлагаемой оптимизацией и реализуется алгоритм быстрой свертки.

В блоке 4 осуществляется вычисление преобразования Фурье (ПФ) от принятого сигнала $S[n]$ для перевода в частотную область $S[k]$.

В блоке 5 происходит формирование спектра опорного сигнала $U_{опорн}[k]$ – область применения предлагаемого метода. В отличие от классической реализации, где опорный сигнал $U_{опорн}(n)$ генерируется и преобразуется заново для каждой итерации, в представленной архитектуре реализовано параметрическое управление генерацией $U_{опорн}(n)$ (тип кода, частота) и повторное использование готовых спектров $U_{опорн}[k]$. Это существенно снижает нагрузку при переборе нескольких навигационных космических аппаратов (НКА) или повторных запусках поиска и, соответственно, уменьшает требуемый объем вычислений при изменении числа доплеровских гипотез и параметров поиска.

В блоке 6 реализуется комплексно-сопряженное перемножение спектров $S[k]$ и $U_{опорн}[k]$, соответствующее корреляции в частотной области.

В блоке 7 производится обратное ПФ (ОПФ) для возврата корреляционной функции во временную область.

В блоке 8 выполняется вычисление модуля комплексного корреляционного отклика. Полученная последовательность $|R[n]|$ представляет собой огибающую корреляционной функции и используется на последующих этапах для некогерентного накопления и принятия решения.

В блоке 9 выполняется некогерентное накопление модулей корреляционного отклика на интервале T_n . В данном режиме суммируются корреляционные отклики на интервале наблюдения. Это

позволяет повысить отношение сигнал / шум при наличии фазовых нестабильностей сигнала. Результирующая последовательность $\Sigma|R[n]|$ поступает в блок 10.

В блоке 10 на основе поступившей последовательности $\Sigma|R[n]|$ осуществляется анализ результатов накопления, принятие решения о наличии сигнала и оценка его задержки. В этом блоке выполняется сравнение максимального значения модуля корреляционного отклика с заданным порогом обнаружения и оценка временной задержки сигнала. В случае превышения порога сигнал считается обнаруженным, а положение максимума определяет оценку временной задержки сигнала.

Универсальность алгоритма (режим совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением) обеспечивается на этапе формирования опоры $U_{\text{опорн}}(n)$ (блок 5). Для сигналов с частотным разделением (ГЛОНАСС L1, L2) в качестве $U_{\text{опорн}}(n)$ используется компенсирующая комплексная экспонента на соответствующей частоте. Для сигналов с кодовым разделением (ГЛОНАСС L3) – эта же экспонента, промодулированная конкретной псевдослучайной последовательностью. Единая структура обработки (блоки 4, 6–10) остается неизменной, что подтверждает возможность создания унифицированного программного приемника.

Для практической отработки и верификации алгоритма обработки сигналов с частотным и кодовым разделением разработана экспериментальная аппаратно-программная платформа, представленная на рисунке 3. Ее конфигурация не является прототипом конечного изделия, а служит для подтверждения корректности предлагаемых решений.

Макет состоит из следующих основных элементов [6]:

- блока антенного (БА) с малошумящим усилителем (производства КБ «Навис» и НТЦ «Модуль»)¹;
- аналогового тракта, преобразующего сигналы разных диапазонов ГНСС на промежуточные частоты 10–20 МГц (производства КБ «Навис» и НТЦ «Модуль»)¹;
- АЦП с частотой дискретизации $f_T = 40,96$ МГц (PDA14, производства Signatec)²;
- опорного генератора (ОГ), формирующего общую тактовую частоту для каждой платы АЦП;
- персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ), осуществляющей запись оцифрованных сигналов на RAID-накопители и обработки на СПО.

Таким образом, разработанная аппаратно-программная платформа реализует полный цикл обработки сигнала. Аппаратная часть платформы, включающая антенные блоки, аналоговый тракт, АЦП и опорный генератор, решает задачу формирования, преобразования и синхронной оцифровки сигналов ГНСС, что функционально соответствует подготовке данных, накапливаемых на ЗУ ПЭВМ (блок 3 на рисунке 2). Программная часть платформы, выполняемая на ПЭВМ, реализована в виде программного модуля в среде MATLAB, который работает в режиме постобработки с данными, предварительно записанными ПЭВМ на RAID-накопители, что функционально соответствует вычислительным этапам предлагаемого алгоритма обработки сигналов с частотным и кодовым разделением, реализованных в функциональных устройствах (блоки 4–10 на рисунке 2).

¹ НТЦ «Модуль». URL: <https://module.ru> (дата обращения 15.02.2026)

² Signatec PDA14 Data Sheet // Artisan Technology Group. URL: https://www.artisanng.com/info/Signatec_PDA14_Datasheet_201571411265.pdf (дата обращения 15.02.2026)

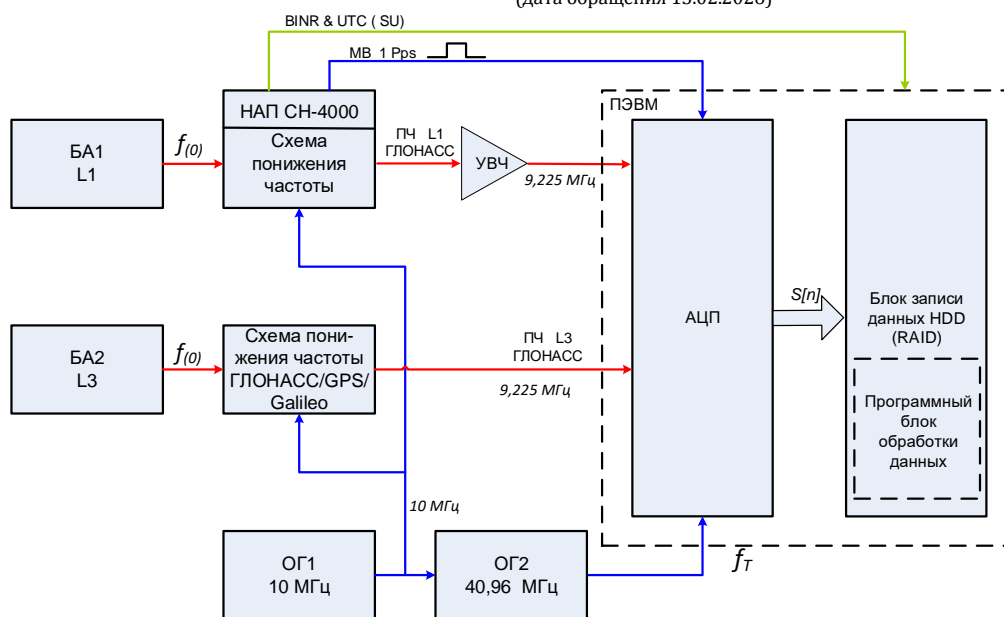


Рис. 3. Структурная схема макета программного приемника навигационных сигналов

Fig. 3. Software Receiver Prototype Block Diagram

С использованием макета программного приемника навигационных сигналов были проведены экспериментальные исследования, включавшие запись эфирного сигнала на промежуточной частоте 9,225 МГц с частотой дискретизации 40,96 МГц и 10-секундными интервалами. Обработка оцифрованного сигнала выполнена по представленному алгоритму в составе СПО. Для заданных параметров макета (частота дискретизации 40,96 МГц, интервал некогерентного накопления 20 мс) длина обрабатываемой реализации составляет 819200 отсчетов. Оценка вычислительной потребности алгоритма получена расчетным путем по числу операций в доминирующих этапах обработки – ПФ, ОПФ, комплексно-сопряженном перемножении спектров, вычислении модуля корреляционного отклика и некогерентном накоплении – и в пересчете на операции с плавающей запятой составляет порядка $(0,9-1,7) \times 10^8$ операций на одну доплеровскую гипотезу. Для диапазона поиска 21–41 доплеровских гипотез это соответствует требуемой производительности порядка 94–340 гигафлопс в режиме реального времени. Таким образом, приведенная оценка характеризует требования к вычислительной платформе и служит основой для выбора элементной базы при переходе к реализации алгоритма в реальном времени.

Особенностью обнаружения навигационного сигнала в частотном диапазоне L3 является использование сигнала с кодовым разделением. Поскольку априорных данных о структуре дальномерного кода нет, то поиск и обнаружение сигнала осуществлялись методом перебора всех дальномерных кодовых последовательностей, алгоритмы

формирования которых описаны в интерфейсном контрольном документе на навигационный радиосигнал в частотном диапазоне L3 с открытым доступом и кодовым разделением (<https://russian-spacesystems.ru/Business/IKD-L3-dlya-KA-N-11-12-02.12.11.pdf>).

На рисунке 4 представлен результат обнаружения навигационного сигнала на выходе корреляционного приемника при использовании некогерентного накопления сигнала на интервале времени 20 мс: огибающие синфазной (оранжевая кривая) и квадратурной (зеленая кривая) составляющих корреляционного отклика приемника в зависимости от задержки опорного кода. Наличие выраженного максимума синфазной составляющей в области ~1800–1900 отсчетов при близком к нулю уровне квадратурной составляющей свидетельствует о достижении в этой точке кодовой синхронизации и успешном обнаружении навигационного сигнала.

Архитектура предложенного алгоритма приема навигационных сигналов системы ГЛОНАСС и разработанного СПО обеспечивает унифицированное вычислительное ядро, применимое к сигналам как с кодовым, так и с частотным разделением. Это создает основу для одновременной обработки сигналов в различных навигационных диапазонах в рамках единой программной платформы. В данной работе экспериментально подтверждена работоспособность платформы для сигналов с кодовым разделением (частотный диапазон L3), возможность обработки сигналов L1, L2 обеспечивается тем же алгоритмическим ядром при смене конфигурационных параметров.

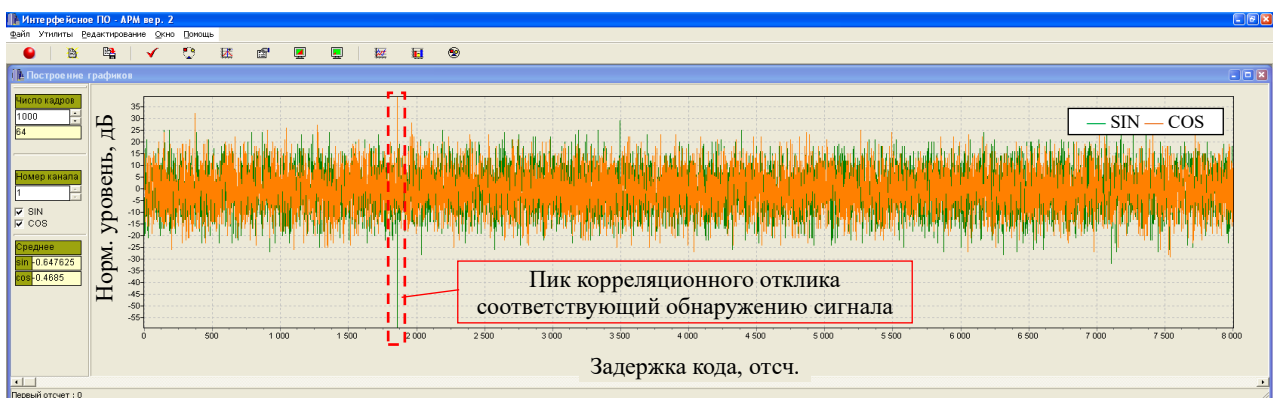


Рис. 4. Сигнал на выходе коррелятора при некогерентном накоплении на интервале 20 мс при обнаружении сигнала ГЛОНАСС в частотном диапазоне L3

Fig. 4. Correlator Output for GLONASS L3 Signal Detection with 20 ms Non-Coherent Integration

Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность программного подхода при обработке навигационных сигналов с частотным и кодо-

вым разделением, что особенно актуально в условиях совершенствования ГНСС.

Предложенный алгоритм приема навигационных сигналов, успешно апробированный в постобра-

ботке на ПЭВМ, демонстрирует возможность реализации в реальном времени при использовании современных высокопроизводительных процессоров (например, GPU серии NVIDIA Jetson или FPGA Xilinx Zynq UltraScale+), принципиальная возможность использования которых для задач цифровой обработки радиосигналов обоснована успешными примерами реализации навигационных приемников реального времени на аналогичных архитектурах [7–10] и согласуется с заявленными характеристиками производительности данных платформ^{3,4,5,6}.

³ NVIDIA Jetson Orin. Next-level AI performance for next-gen robotics and edge solutions // NVIDIA. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin> (дата обращения 15.02.2026)

⁴ NVIDIA Jetson AGX Orin Series Technical Brief (TB-10749-001, v1.2). URL: <https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/gtc/t21/jetson-orin/nvidia-jetson-agx-orin-technical-brief.pdf> (дата обращения 15.02.2026)

⁵ Zynq UltraScale+ MPSoC Data Sheet: Overview (DS891) // AMD URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds891-zynq-ultrascale-plus-overview.pdf (дата обращения 15.02.2026)

⁶ Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview (DS190) // Xilinx. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-zynq-7000-overview.pdf (дата обращения 15.02.2026)

Разработка компактных и функциональных образцов навигационной аппаратуры, соответствующих современным требованиям потребителей, возможна лишь при применении технологии программного приема сигналов. Ключевое преимущество данного подхода заключается в его адаптивности: изменение параметров навигационных сигналов не требует модификации аппаратной части, а реализуется за счет перепрограммирования программно-определяемого радиоприемного тракта. Это обеспечивает гибкость, масштабируемость и снижение стоимости жизненного цикла изделий по сравнению с классическими аналого-цифровыми архитектурами. Перечисленные свойства предложенного алгоритма обеспечивают его универсальность, подтвержденную экспериментально при обработке сигналов различных ГНСС с частотным и кодовым разделением.

Полученные результаты формируют основу для перехода к инженерной реализации унифицированного вычислительного ядра, ориентированного на перспективные образцы НАП.

Список источников

1. Tsui J.B.Y. *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005. 352. p.
2. Kaplan E.D., Hegarty C.J. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House, 2017. 1062 p.
3. Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., Rinder P., Jensen S.H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser, 2007. 176 p. DOI:10.1007/978-0-8176-4540-3
4. Morton Y., van Diggelen F., Spilker Jr. J.J., Parkinson B.W. Lo S., Gao G. (eds.). *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2021. Vol. 1. 1136 p.
5. Енин С.В., Меняйлов Д.Е., Дугаев В.М., Панин Г.А., Вишин Д.Ф., Петричкович Я.Я. и др. Устройство для приема сигналов системы спутниковой навигации. Патент на полезную модель № RU 109872 U1 от 26.05.2011. Опубл. 27.10.2011. EDN:WSEGWS
6. Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Герасименко И.С., Добриков В.А., Иванов В.Ф., Симонов А.Б. и др. Программный приемник сигналов спутниковых навигационных систем на базе СБИС К1879ХК1Я // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 230–235. EDN:PHSJFV
7. Hobiger T., Gotoh T., Amagai J., Koyama Y., Kondo T. A GPU based real-time GPS software receiver // *GPS Solutions*. 2010. Vol. 14. PP. 207–216. DOI:10.1007/s10291-009-0135-2. EDN:QTDPOX
8. Seo J., Chen Y.-H., De Lorenzo D.S., Lo S., Enge P., Akos D., et al. A Real-Time Capable Software-Defined Receiver Using GPU for Adaptive Anti-Jam GPS // *Sensors*. 2011. Vol. 11. PP. 8966–8991. DOI:10.3390/s110908966
9. Huang K.-Y., Juang J.-C., Tsai Y.-F., Lin C.-T. Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding // *Sensors*. 2021. Vol. 21. PP. 4634. DOI:10.3390/s21144634. EDN:WRUQFZ
10. Majoral M., Fernández-Prades C., Arribas J. A Flexible System-on-Chip Field-Programmable Gate Array Architecture for Prototyping Experimental Global Navigation Satellite System Receivers // *Sensors*. 2023. Vol. 23. PP. 9483. DOI:10.3390/s23239483. EDN:KAUYXU

References

1. Tsui J.B.Y. *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*. Hoboken: Wiley-Interscience; 2005. 352. p.
2. Kaplan E.D., Hegarty C.J. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House; 2017. 1062 p.
3. Borre K., Akos D. M., Bertelsen N., Rinder P., and Jensen S. H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser; 2007. 176 p. DOI:10.1007/978-0-8176-4540-3
4. Morton Y., van Diggelen F., Spilker Jr. J.J., Parkinson B.W. Lo S., Gao G. (eds.). *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, vol.1*. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2021. 1136 p.
5. Enin S.V., Menyailov D.E., Dugaev V.M., Panin G.A., Vishin D.F., Petrichkovich Ya.Ya., et al. *Device for Receiving Signals from a Satellite Navigation System*. Patent RF, no. 109872, 26.05.2011. (in Russ.) EDN:WSEGWS


6. Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Gerasimenko I. S., Dobrikov V. A., Ivanov V. F., Simonov A.B., et al. Software-Defined Receiver for GNSS Signals Based on SBIS K1879HK1YA. Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences. 2012;23:230–235. (in Russ.) EDN:PHSJFV
7. Hobiger T., Gotoh T., Amagai J., Koyama Y., Kondo T. A GPU based real-time GPS software receiver. *GPS Solutions*. 2010; 14:207–216. DOI:10.1007/s10291-009-0135-2. EDN:QTDPOX
8. Seo J., Chen Y.-H., De Lorenzo D.S., Lo S., Enge P., Akos D., et al. A Real-Time Capable Software-Defined Receiver Using GPU for Adaptive Anti-Jam GPS. *Sensors*. 2011;11:8966–8991. DOI:10.3390/s110908966
9. Huang K.-Y., Juang J.-C., Tsai Y.-F., Lin C.-T. Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding. *Sensors*. 2021;21:4634. DOI:10.3390/s21144634. EDN:WRUQFZ
10. Majoral M., Fernández-Prades C., Arribas J. A Flexible System-on-Chip Field-Programmable Gate Array Architecture for Prototyping Experimental Global Navigation Satellite System Receivers. *Sensors*. 2023;23:9483. DOI:10.3390/s23239483. EDN:KAUYXU

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 03.04.2026.


The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 31.03.2026; accepted for publication 03.04.2026.

Информация об авторах:

КОЗЛОВ
Алексей Васильевич

кандидат технических наук, начальник отдела Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского
 <https://orcid.org/0009-0009-7037-3383>


ПЕТУШКОВ
Александр Михайлович

кандидат военных наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского
 <https://orcid.org/0009-0007-9130-4382>

САКОВСКИЙ
Евгений Александрович

старший научный сотрудник лаборатории Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского
 <https://orcid.org/0009-0002-1667-7246>

СОЛОВЬЁВ
Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны РФ Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского
 <https://orcid.org/0009-0001-7125-6009>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.397

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-35-43>

EDN:ZBQLJP



Анализ и исследование реализации услуг дополненной реальности

✉ Мария Александровна Маколкина, makolkina.ma@sut.ru

✉ Артём Дмитриевич Стерликов ✉, sterlikov.ad@sut.ru

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

Аннотация

Сегодня появляется большое количество услуг, ориентированных на передачу трафика дополненной реальности в режиме реального времени. Это приводит к сложной задаче формирования показателей, оказывающих наибольшее влияние на оценку качества предоставления услуг дополненной реальности, которая проникла во все сферы человеческой жизни и уверенно занимает все возрастающую долю рынка телекоммуникаций. Она позволяет отображать дополнительную информацию о существующих в физическом мире объектах с помощью различных идентификаторов. Ее область использования начинается от образования и медицины, и продолжается применением при предоставлении услуг тактильного Интернета вещей, а также беспилотного транспорта и услуг телеприсутствия. В данном исследовании для разных беспроводных технологий, используемых для предоставления услуги дополненной реальности через мобильное приложение, проведена комплексная оценка качества восприятия субъективными и объективными методами. Проанализированы разные устройства и области применения дополненной реальности в сетях связи. Выделено приложение, географически распределенное по разным городам. Выполнен анализ параметров сети и получены результаты расчетов параметра Хёрста и субъективной оценки качества для различных беспроводных технологий и разной плотности пользователей. Установлена взаимосвязь между субъективными и объективными оценками качества предоставления услуг дополненной реальности. **Актуальность** работы обусловлена необходимостью определения субъективных оценок и параметра Хёрста в зависимости от используемых беспроводных технологий дополненной реальности.

Используемые методы: анализ графика изменения дисперсии для обработки результатов эксперимента. **Результаты** обоснованы и могут быть добавлены к характеристикам сети для оценки работы мобильного приложения дополненной реальности.

Новизна полученных результатов заключается в том, что рассмотрен подход к оценке качества предоставления услуг дополненной реальности, основанный на установленной взаимосвязи субъективных оценок и коэффициента Хёрста.




Практическая значимость: выделено мобильное приложение дополненной реальности, географически распределенное по городам с разной плотностью населения. Выполнен анализ сети в разные временные периоды и получены результаты расчетов для беспроводных технологий Wi-Fi и 4G с целью определения зависимости коэффициента временного ряда и средней интенсивности размера пакетов. Проведена комплексная оценка качества восприятия субъективными и объективными методами. Проведена комплексная оценка качества восприятия субъективными и объективными методами ACR. Разработана структура экспериментального стенда и алгоритм проведения эксперимента.

Ключевые слова: дополненная реальность, анализ трафика, интенсивность пакетов, коэффициент зависимости временного ряда, распределение интервалов времени

Ссылка для цитирования: Маколкина М.А., Стерликов А.Д. Анализ и исследование реализации услуг дополненной реальности // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 35–43. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-35-43. EDN:ZBQLJP

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-35-43>
EDN:ZBQLJP

Analysis and Research of AR Services Implementation

 **Maria A. Makolkina**, makolkina.ma@sut.ru
 **Artem D. Sterlikov** , sterlikov.ad@sut.ru

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

Annotation

*Today, many services are emerging that transmit augmented reality traffic in real time. This leads to the complex task of formulating metrics for evaluating augmented reality services. This article examines a comparison of wireless augmented reality technologies for a mobile application. This leads to the difficult task of generating indicators that have the greatest impact on assessing the quality of augmented reality services. In this study, a comprehensive assessment of the quality of perception using subjective and objective methods was carried out for various wireless technologies used to provide augmented reality services through a mobile application. The application is highlighted, geographically distributed across different cities. The analysis of network parameters was performed and the results of calculations of the Hurst parameter and subjective quality assessment for various wireless technologies and different user densities were obtained. The relationship between subjective and objective assessments of the quality of augmented reality services has been established. **The relevance** of this work is determined by the need to determine subjective assessments and the Hurst exponent depending on the wireless augmented reality technologies used.*

Method. When processing the experimental results, the method of analyzing the variance graph was used.

The results are substantiated and can be added to the network characteristics for evaluating the performance of a mobile augmented reality application.

The novelty of the obtained results lies in the fact that an approach to assessing the quality of augmented reality services is considered, based on the established relationship between subjective assessments and the Hurst exponent.

Practical significance: an application is geographically distributed across cities with different population densities. Network analysis is performed over different time periods and calculation results are obtained for Wi-Fi and 4G wireless technologies in order to determine the relationship between the time series coefficient and the average packet size intensity. A comprehensive assessment of the quality of perception by subjective and objective methods was carried out.

Keywords: augmented reality, traffic analysis, packet intensity, time series dependence coefficient, time interval distribution

For citation: Makolkina M.A., Sterlikov A.D. Analysis and Research of AR Services Implementation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):35–43. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-35-43. EDN:ZBQLJP

Введение

В современном мире телекоммуникаций постоянно развиваются существующие технологии и появляются новые услуги. Одной из услуг, способных расширить возможности пользователя по восприятию информации об окружающих объектах, является дополненная реальность (AR, аббр. от англ. Augmented Reality). Для метавселенной используются различные иммерсивные технологии, в том

числе AR, которая позволяет взаимодействовать с цифровыми и искусственными мирами, а также друг с другом, соединять цифровые и реальные миры в режиме реального времени [1]. Дополненная реальность позволяет отображать дополнительную информацию о существующих в физическом мире объектах с помощью различных идентификаторов, в том числе RFID-меток, QR-кодов и распознавания образов [2]. Особое внимание уделено пользовательскому опыту и взаимодействию с AR-

приложениями, что является важным аспектом успешной реализации услуг в данной сфере. На сегодняшний день существует достаточно большое количество AR-приложений в различных сферах, таких как медицина, образование, туризм и так далее [3, 4], которые могут сильно отличаться друг от друга в зависимости от назначения и способа отображения информации. Удовлетворенность пользователя услугами AR будет очень сильно зависеть от адекватного выбора способа отображения. Например, если человек управляет автомобилем и движется на большой скорости, он не сможет воспринять видеопоток большого разрешения, так как он сосредоточен на дороге, и ему будет достаточно аудио.

Так, с AR-устройствами появляются новые возможности по анализу существующих систем на возможность модернизации и внедрения современных технологий. Анализ существующих услуг дополненной реальности позволит не только оценить текущий уровень развития технологии, но и выявить области, где она может принести наиболь-

шую пользу. Приложения в сфере туризма, описания музейных экспонатов, архитектурных объектов и объектов окружающей среды наиболее популярны¹ [5]. Качество предоставления услуг AR зависит как от работы самого приложения, так и от работы сети. Технологии беспроводного доступа, которые чаще всего используются для реализации приложений AR, будут оказывать существенное влияние на качество восприятия пользователя.

В статье рассматривается подход к оценке качества представления услуг AR, основанный на установленной взаимосвязи субъективных оценок и коэффициента Хёрста [6, 7]. В ходе исследования рассмотрены беспроводные технологии Wi-Fi и 4G в различных городах с разной плотностью пользователей и зонами покрытия, используемые для AR и произведена субъективная оценка качества передачи трафика и расчет параметра Хёрста.

Постановка задачи

Сегодня AR-приложения активно используются в различных сферах деятельности. Пример их использования представлен на рисунке 1.

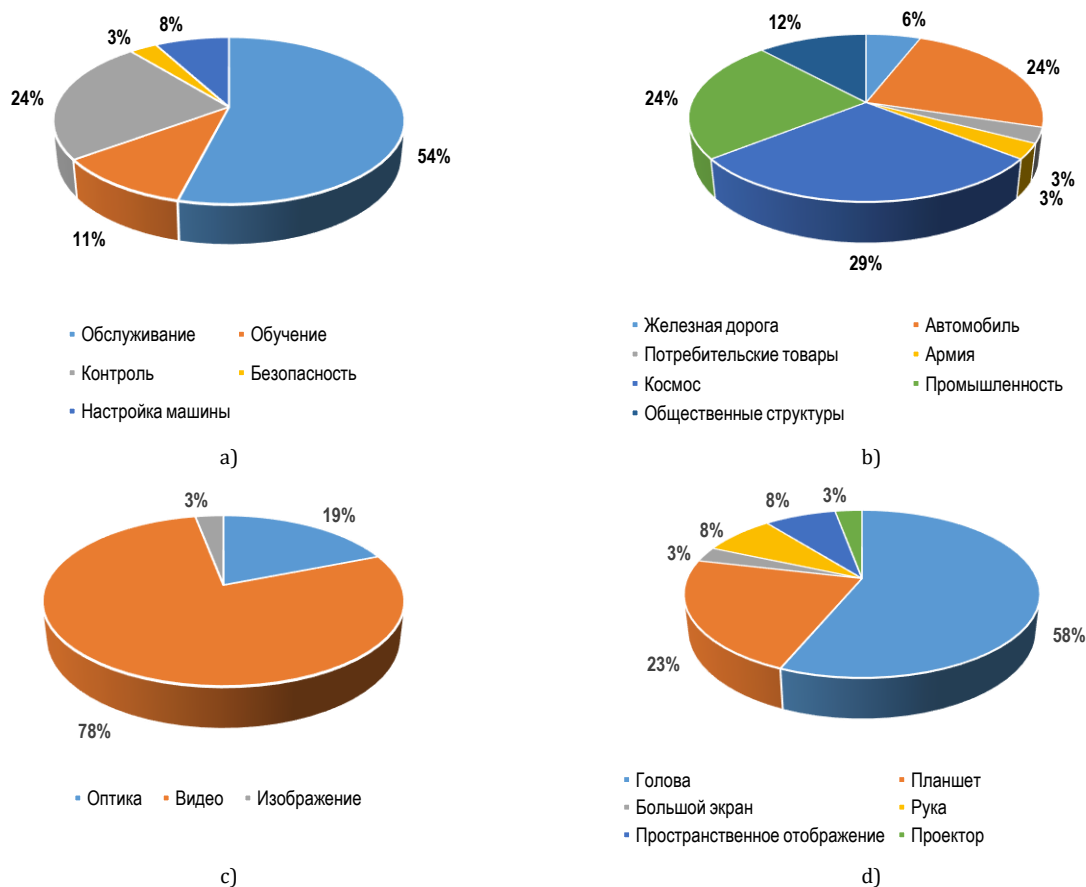


Рис. 1. Распределение AR-приложений по услуге (а), области применения (b), методам наложения AR (с), устройству отображения AR (d)

Fig. 1. Distribution of AR Applications by Service (a), application area (b), AR Overlay Methods (c), AR Display Device (d)

¹ Star Walk 2. Приложение для наблюдения за звездным небом. URL: <https://starwalk.space/ru> (дата обращения 09.06.2026)

AR-технологии пригодились и в бизнесе, их потенциальная применимость охватывает множество разных сфер и функционалов. Потенциально компании смогут отказаться от физических офисов и обслуживать клиентов в виртуальной реальности, быстро и эффективно обучать новых сотрудников, проводить совещания, не находясь в одном месте [8].

AR-технологии внедряют в игры, чтобы пользователи могли взаимодействовать с виртуальными объектами и персонажами в реальной среде. Например, в мобильной игре Minecraft Earth игроки ищут блоки в реальном мире с помощью экрана мобильного устройства. В приложениях вроде Яндекс Карт и Google Maps используют AR, чтобы пользователям было проще ориентироваться в пространстве. К реальным изображениям улиц и зданий добавляются виртуальные надписи и указатели. А в приложениях аэропорта Шереметьево внедрили AR-технологии от Sber. Теперь пользователи могут построить маршрут внутри аэропорта, например до терминала вылета или кафе, и увидеть виртуальные подсказки через камеру смартфона.

Пользователям необходимо подключаться к сети через различные технологии доступа. Они могут влиять на качество услуги. Поэтому дальнейшее исследование будет направлено на анализ характеристик сети доступа при использовании AR-приложений и оценку качества предоставления данных услуг [9].

Структура сети для исследования

Коммуникационные технологии, например, Wi-Fi, могут работать, будучи использованными устройствами вроде смарт-очков. Применение 4G и Wi-Fi действительно может значительно улучшить ситуацию. Во-первых, доступная пропускная способность увеличивается, что частично компенсирует высокие требования к скорости передачи данных. Во-вторых, данные с ограниченной задержкой могут быть отправлены по каналу с минимальным наблюдаемым временем прохождения сигнала туда и обратно. Пакеты данных, относящиеся к классу трафика с восстановлением после потерь, также могут быть отправлены по обоим каналам, чтобы предотвратить дорогостоящий процесс восстановления. Используя Wi-Fi и 4G одновременно, можно значительно улучшить задержку и пропускную способность [10].

Технологию Wi-Fi сравнительно проще развертывать через беспроводные маршрутизаторы и точки доступа для полного покрытия сети. Две полосы частот, а именно sub-6G с полосой пропускания 100 МГц используются сетями 5G, тогда как три непересекающихся канала с полосой пропускания 60–80 МГц используются точками доступа Wi-Fi 6 для получения высокой производительности и иммерсивной среды в AR [11].

Технологии 4G, также известные как LTE-модули, обеспечивают высокоскоростное сотовое соединение для приложений Интернета вещей, а также – надежную и стабильную передачу данных, что делает их подходящими для широкого спектра применения Интернет вещей, включая управления автопарком, мониторинг состояния здоровья и интеллектуальные системы учета [12].

ТАБЛИЦА 1. Характеристики для беспроводных технологий дополненной реальности

TABLE 1. Specifications for Wireless Augmented Reality Technologies

Характеристика	4G	Wi-Fi
Диапазон частот	700 МГц 2600 МГц	2,4 ГГц 5 ГГц
Максимальная дальность	до 10 км	до 100 м (в помещении)
Скорость передачи данных	до 300 Мбит/с	до 9,6 Гбит/с
Сетевое взаимодействие	Пиринговая связь	Точка – точка
Применение	Передача данных, аудио, подключение устройства	Высокоскоростная передача данных, интернет
Стандарт	LTE	IEEE 802.11

Анализ результатов исследования

Исследование проведено в городах с различной плотностью пользователей и зонами покрытия для AR-приложения. В качестве беспроводной связи использованы две технологии: Wi-Fi (IEEE 802.11) и 4G (LTE). Замеры проведены с помощью персонального компьютера. На ноутбук установлен эмулятор Android BlueStacks X с приложением дополненной реальности Star Walk 2. Анализ трафика беспроводной сети выполнен в программе Wireshark. Схема стенда представлена на рисунке 2.

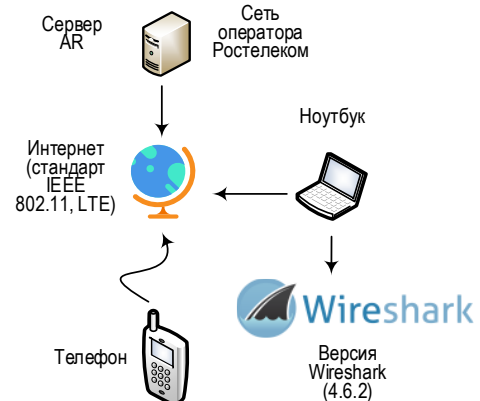


Рис. 2. Схема стенда для исследования

Fig. 2. Layout of the Research Setup

Эксперимент состоял из четырех этапов.

Этап 1. Подключить персональный компьютер Digma Pro Sprint M к сети связи через технологию Wi-Fi и 4G.

Этап 2. Включить мобильное AR-приложение для наблюдения за звездным небом Star Walk 2 и запустить программу для захвата пакетов Wireshark.

Этап 3. Выполнить захват пакетов в реальном времени (время захвата пакетов 5–10 мин.).

Этап 4. Проанализировать трафик реального времени в течение 5–10 мин.

Перед началом эксперимента было проведено 54 исследования: 16 – в Самаре, 12 – в Чапаевске, 19 – в Санкт-Петербурге, 7 – в Сосновом Бору.

В Самаре исследование проведено в университете ПГУТИ во время зимних каникул. Поэтому на графике видно, что интенсивность не превышает 100 пакетов в секунду. Среднее значение интенсивности составило 50 пакетов в секунду (рисунок 3а).

В Чапаевске исследование проведено в торговом центре «Панорама». Исходя из того, что плотность пользователей в городе небольшая в связи с временным периодом новогодних праздников, можно наблюдать на графике, что интенсивность не превышает 80 пакетов в секунду. Среднее значение интенсивности – 40 пакетов в секунду (рисунок 3б).

По результатам исследования, уровень ошибок протокола TCP при передаче трафика во время зимних каникул выше в Чапаевске по сравнению с Самарой. В Самаре средняя интенсивность пакетов с ошибками достигает 5 пакетов в секунду. В Чапаевске это значение доходит до 20 пакетов в секунду. Исследовалось AR-приложение Star Walk 2. В случае интенсивности пакетов с ошибками возникла рассинхронизация картинок описания и более длительное время отклика.

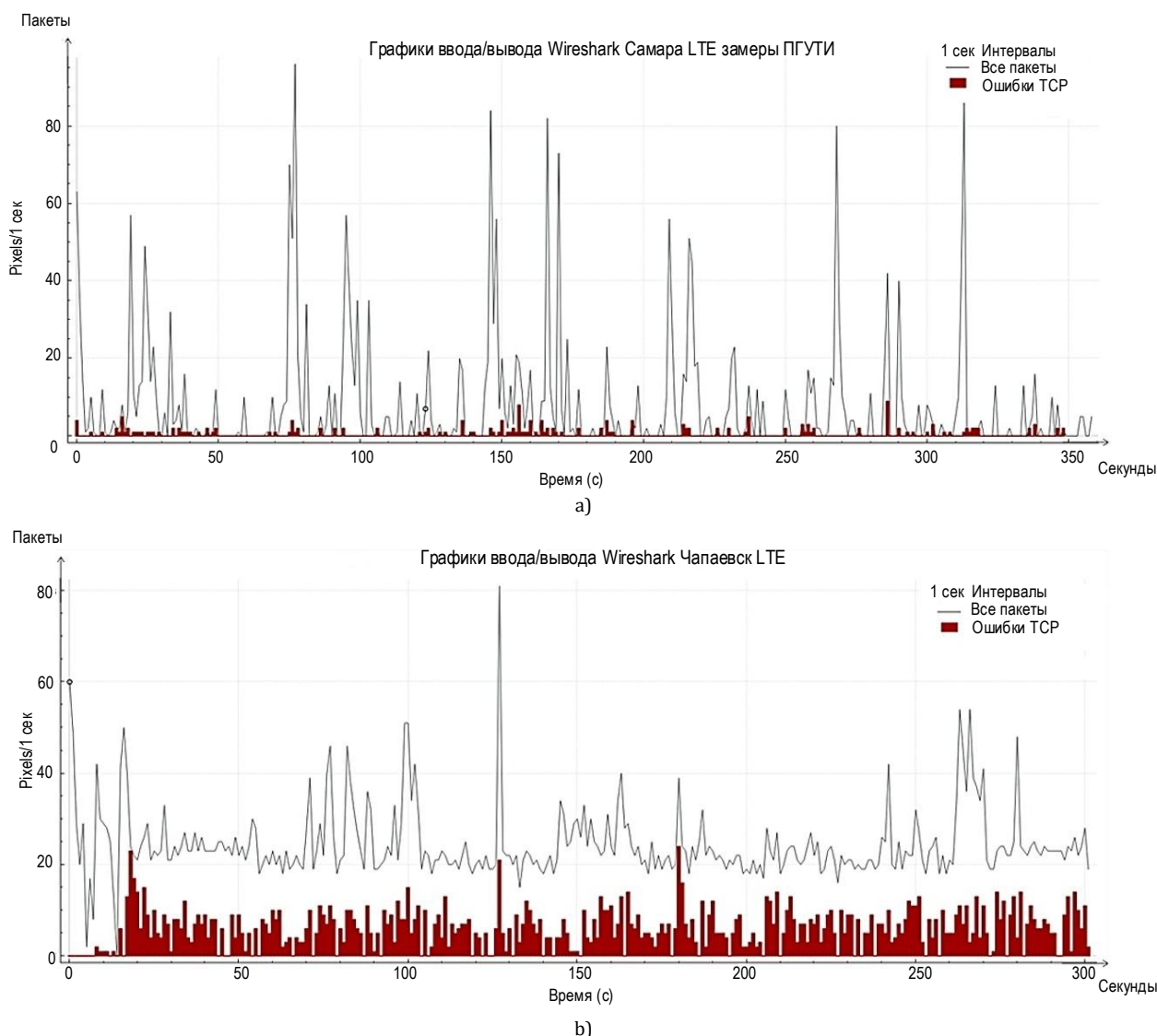


Рис. 3. Средняя интенсивность пакетов LTE в Самаре (а) и в Чапаевске (б)

Fig. 3. Average intensity of LTE packets in Samara (a) and Chapaevsk (b)

Для эксперимента используем три значения из программы Wireshark: No., Time и Length. Значение No. показывает номер пакета в списке пакетов и варьируется в диапазоне от 1 до 2844. Значение Time

показывает время захвата каждого пакета и варьируется в диапазоне 0–8 с. Значение Length отображает размер захваченного пакета и варьируется от 42 до 5494 байт. Исходные данные представлены на рисунке 4.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length
1		8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
2	0.000201	172.20.10.11	8.8.8.8	TCP	
3	0.001443	172.20.10.11	8.8.8.8	TLSv1.2	
4	0.074748	8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
5	0.000000	8.8.8.8	172.20.10.11	TLSv1.2	
6	0.001595	172.20.10.11	8.8.8.8	TLSv1.2	
7	0.003700	172.20.10.11	8.8.8.8	TLSv1.2	
8	0.082589	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
9	0.036598	172.20.10.11	142.250.150.94	TCP	
10	0.039939	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
11	0.074104	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
12	0.035084	8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
13	0.000227	172.20.10.11	8.8.8.8	TCP	
14	0.072027	172.20.10.11	8.8.8.8	TCP	
15	0.015910	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
16	0.033984	8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
17	0.000479	142.250.150.94	172.20.10.11	TCP	
18	0.000219	172.20.10.11	142.250.150.94	TCP	
19	0.000819	8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
20	0.001633	74.125.205.113	172.20.10.11	QUIC	
21	0.008619	8.8.8.8	172.20.10.11	TLSv1.2	
22	0.006873	8.8.8.8	172.20.10.11	TCP	
23	0.013150	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
24	0.001343	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
25	0.005729	172.20.10.11	209.85.233.95	TCP	
26	0.013408	172.20.10.11	8.8.8.8	TCP	
27	0.002498	74.125.205.113	172.20.10.11	QUIC	
28	0.053677	172.20.10.11	74.125.205.113	QUIC	
29	0.004423	209.85.233.95	172.20.10.11	TCP	
30	0.000247	172.20.10.11	209.85.233.95	TCP	
31	0.002012	74.125.205.113	172.20.10.11	QUIC	

Рис. 4. Исходные данные в программе Wireshark

Fig. 4. Source Data in the Wireshark Program

Перенесем значения трех столбцов в программу Excel для дальнейших расчетов. Известно, что для стационарных в широком смысле процессов их среднее значение и дисперсия неизменны на всей области существования.

Однако в действительности проверка этого положения на конечной выборке (например, видеоданные) затруднена [13], поэтому статистические характеристики, такие как выборочное среднее значение и дисперсия, обычно определяются в виде:

$$M(X) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k, \quad (1)$$

$$D(X) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_k - M(X))^2. \quad (2)$$

где $M(X)$ – операция усреднения дисперсии; $x_k, k = 1, 2, \dots, K$ – набор данных.

Среднее значение получилось 0,547, дисперсия – 0,93 (доля измерений, которая вошла в выборку). Построим вероятность попадания в интервал времени между пакетами. В ходе исследования была проведена аппроксимация графика экспоненциальным распределением. Этот график позволяет

упростить анализ и вычисления, особенно когда точный аналитический вид функции неизвестен или сложен для работы. Результаты приведены на рисунке 5.

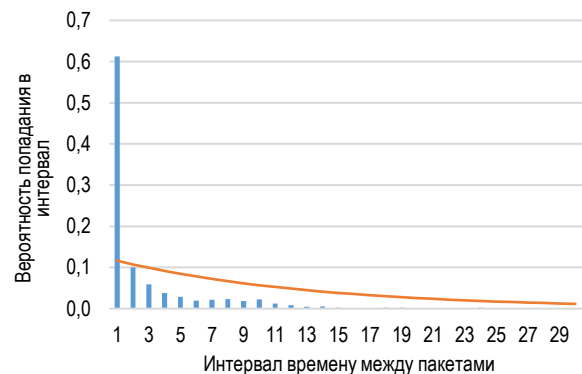


Рис. 5. Аппроксимация графика вероятности попадания в интервал времени между пакетами экспонентой

Fig. 5. Approximation of the Probability Graph of Hitting the Time Interval between Packets by an Exponential Function

Расчет коэффициента Хёрста

В ряде работ параметр Хёрста рассматривался как один из основных показателей оценки качества предоставления услуг AR. Существуют различные методы оценки параметра Хёрста: временные, чис-

ленные, вейвлет-преобразование. Наиболее распространенным является метод анализа графика изменения дисперсии. Из программы Wireshark импортированы исходные данные – один столбец Time. Этот столбец переименован в Packets (сделано для дальнейшего программирования).

В целях автоматизации параметра Хёрста и обработки полученных из Wireshark данных был написан скрипт на языке Python. Код Хёрста, который считывает данные файла Hack.csv на языке программирования Python, представлен на рисунке 6.

```
parametr Hersta.py - C:\Users\istre\AppData\Local\Programs\Python\Python314\parametr H...
File Edit Format Run Options Window Help
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from hurst import compute_Hc, random_walk
import pandas as pd

data = pd.read_csv("Hack.csv")
packets = data["Packets"].dropna()

# Evaluate Hurst equation
H, c, data = compute_Hc(packets, kind='price', simplified=True)

# Plot
f, ax = plt.subplots()
ax.plot(data[0], c*data[0]**H, color="deepskyblue")
ax.scatter(data[0], data[1], color="purple")
ax.set_xscale('log')
ax.set_yscale('log')
ax.set_xlabel('Time interval')
ax.set_ylabel('R/S ratio')
ax.grid(True)
plt.show()

print("H={:.4f}, c={:.4f}".format(H,c))
```

Рис. 6. Скрипт для расчета параметра Хёрста на языке Python

Fig. 6. A Python Script for Calculating the Hearst's

В процессе компиляции кода формируется графический результат. Полученный график с определением коэффициента Хёрста представлен на рисунке 7.

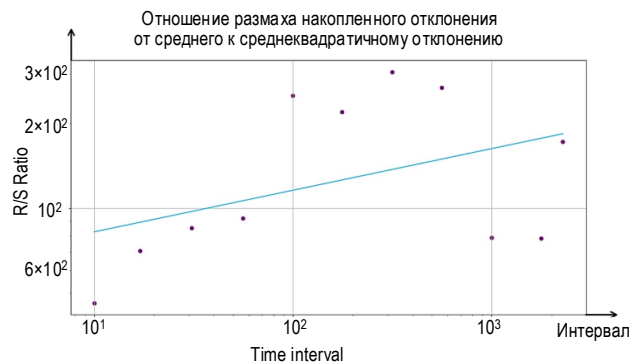


Рис. 7. Оценка коэффициента Хёрста методом анализа графика изменения дисперсии для мобильного AR-приложения

Fig. 7. Estimating the Hurst Exponent Using the Variance Plot Method for a Mobile AR Application

Расчет параметра Хёрста:

$$H = 1 - \frac{\beta}{2}, \tag{3}$$

где H – коэффициент Хёрста; β – угол между прямой линией и горизонталью.

Угол между прямой линией и горизонталью получился 29°. Следовательно, коэффициент Хёрста равен 0,738. Результат удовлетворяет условию:

$$0 < H < 1. \tag{4}$$

Параметр Хёрста находится в диапазоне 0,5–0,9.

В ходе проведения эксперимента анализировался трафик в нескольких городах от разных приложений дополненной реальности при изменениях в условии работы сети. Параллельно проводилась субъективная оценка качества услуг дополненной реальности с использованием метода ACR [14]. В эксперименте участвовало 9 человек, длительность захвата трафика составляла 5 мин., оценки выставлялись по 5-балльной шкале, параллельно рассчитывался параметр Хёрста. Сводные результаты представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Оценка параметра Хёрста и субъективная оценка для разных AR-технологий

TABLE 2. Evaluation of the Hearst Parameter and Subjective Evaluation for Different AR Technologies

№ п/п	Технология 4G / Wi-Fi		
	Пропускная способность, кбит/с	Субъективная оценка	Параметр Хёрста
1	138 / 421	3,2 / 2,8	0,738 / 0,685
2	30 / 93	3,35 / 2,9	0,773 / 0,694
3	6,3 / 130	3,78 / 3,51	0,851 / 0,712
4	2,5 / 6,4	4,09 / 3,57	0,921 / 0,746

Корреляция субъективных оценок и параметра Хёрста представлена на рисунке 8.

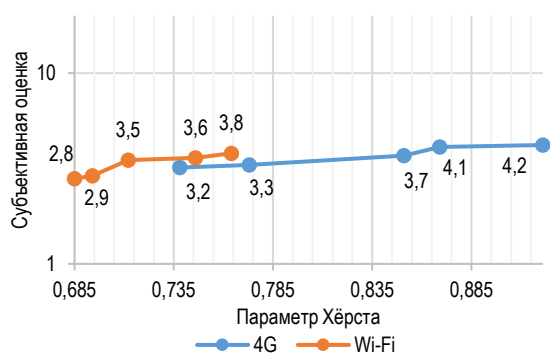


Рис. 8. Взаимосвязь между субъективными оценками и параметром Хёрста

Fig. 8. The Relationship between Subjective Assessments and the Hurst Parameter

Заключение

В рамках данного исследования был проведен эксперимент по оценке качества предоставления

для работы AR-приложения в городах с разной плотностью населения, в различные временные диапазоны и время суток, а также для различных технологий доступа.

В ходе эксперимента была проведена корреляция субъективных и объективных оценок, выявлена подобная взаимосвязь. Также установлено, что с ростом параметра Хёрста увеличилось и значение субъективных оценок, что позволяет сделать вывод о применимости параметра Хёрста для оценки качества предоставления услуг дополненной реальности. Однако существующих метрик недостаточно, чтобы полностью оценить удовлетворенность пользователя услугой, поскольку на сегодняшний день больше внимания уделяют таким критериям, как информативность контента, актуальность и т. д., что ставит новые задачи перед операторами связи.

Список источников

1. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. River Publishers, 2025. DOI:10.1201/9788770046749
2. Alkady Y., Rizk R., Alsekait D.M., Alluhaidan A.S., Abdelminaam D.S. SINS_AR: An Efficient Smart Indoor Navigation System Based on Augmented Reality // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 109171–109183. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3439357. EDN:FLGUIN
3. Villagran-Vizcarra D.C., Luviano-Cruz D., Pérez-Domínguez L.A., Méndez-González L.C., Garcia-Luna F. Applications Analyses, Challenges and Development of Augmented Reality in Education, Industry, Marketing, Medicine, and Entertainment // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 5. P. 2766. DOI:10.3390/app13052766. EDN:EDGKHL
4. Dargan S., Bansal S., Kumar M., Mittal A., Kumar K. Augmented Reality: A Comprehensive Review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 30. PP. 1057–1080. DOI:10.1007/s11831-022-09831-7. EDN:MNIGGL
5. Anwar M.S., Yang J., Frnda J., Choi A., Baghaei N., Ali M. Metaverse and XR for cultural heritage education: applications, standards, architecture, and technological insights for enhanced immersive experience // Virtual Reality. 2025. Vol. 29. P. 51. DOI:10.1007/s10055-025-01126-z. EDN:BSELAT
6. Makolkina M., Prokopiev A., Paramonov A., Koucheryavy A. The Quality of Experience Subjective Estimations and the Hurst Parameters Values Interdependence // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 2014. Vol. 8638. PP. 311–318. DOI:10.1007/978-3-319-10353-2_27. EDN:UEUIQL
7. Kirichek R., Makolkina M., Sene J., Takhtuev V. Estimation Quality Parameters of Transferring Image and Voice Data over ZigBee in Transparent Mode // Distributed Computer and Communication Networks. 2016. Vol. 601. PP. 260–267. DOI:10.1007/978-3-319-30843-2_27. EDN:VPGRAZ
8. Dini G., Dalle Mura M. Application of Augmented Reality Techniques in Through-life Engineering Services // Procedia CIRP. 2015. Vol. 38. PP. 14–23. DOI:10.1016/j.procir.2015.07.044
9. Chandra G.R., Rekha K.Ch.C., Varshitha K., Sravani D., Vadlamudi V. HoloComm: An Augmented Reality – Based Public Information and Navigation System // International Journal for Research in Science & Advanced Technologies. 2026. Vol. 26. Iss. 4. PP. 532–536. DOI:10.65726/ijrsat.2026.V26.I04.22. EDN:GKFTBK
10. Pendit U.C., Zaibon S.B., Bakar J.A.A. Conceptual model of mobile augmented reality for cultural heritage site towards enjoyable informal learning aspect // Jurnal Teknologi. 2025. Vol. 77. Iss. 29. DOI:10.11113/jt.v77.6847
11. Lv Z., Lloret J., Song H. Internet of Things and augmented reality in the age of 5 G // Computer Communications. 2020. Vol. 164. PP. 158–161. DOI:10.1016/j.comcom.2020.08.019. EDN:TJEGNO
12. Aguero M., Maharjan D., del Pilar Rodriguez M., Mascarenas D.D.L., Moreu F. Design and Implementation of a Connection between Augmented Reality and Sensors // Robotics. 2020. Vol. 9. Iss. 1. P. 3. DOI:10.3390/robotics9010003
13. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы: телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
14. Rec. ITU-T P.910. Subjective video quality assessment methods for multimedia applications. 2023.

References

1. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. River Publishers; 2025. DOI:10.1201/9788770046749
2. Alkady Y., Rizk R., Alsekait D.M., Alluhaidan A.S., Abdelminaam D.S. SINS_AR: An Efficient Smart Indoor Navigation System Based on Augmented Reality. IEEE Access. 2024;12:109171–109183. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3439357. EDN:FLGUIN


3. Villagran-Vizcarra D.C., Luviano-Cruz D., Pérez-Domínguez L.A., Méndez-González L.C., Garcia-Luna F. Applications Analyses, Challenges and Development of Augmented Reality in Education, Industry, Marketing, Medicine, and Entertainment. *Applied Sciences*. 2023;13(5):2766. DOI:10.3390/app13052766. EDN:EDGKHL
4. Dargan S., Bansal S., Kumar M., Mittal A., Kumar K. Augmented Reality: A Comprehensive Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022;30:1057–1080. DOI:10.1007/s11831-022-09831-7. EDN:MNIGGL
5. Anwar M.S., Yang J., Frnda J., Choi A., Baghaei N., Ali M. Metaverse and XR for cultural heritage education: applications, standards, architecture, and technological insights for enhanced immersive experience. *Virtual Reality*. 2025;29:51. DOI:10.1007/s10055-025-01126-z. EDN:BSELAT
6. Makolkina M., Prokopiev A., Paramonov A., Koucheryavy A. The Quality of Experience Subjective Estimations and the Hurst Parameters Values Interdependence. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. 2014: 8638:311–318. DOI:10.1007/978-3-319-10353-2_27. EDN:UEUIQL
7. Kirichek R., Makolkina M., Sene J., Takhtuev V. Estimation Quality Parameters of Transferring Image and Voice Data over ZigBee in Transparent Mode. *Distributed Computer and Communication Networks*. 2016;601:260–267. DOI:10.1007/978-3-319-30843-2_27. EDN:VPGRAZ
8. Dini G., Dalle Mura M. Application of Augmented Reality Techniques in Through-life Engineering Services. *Procedia CIRP*. 2015;38:14–23. DOI:10.1016/j.procir.2015.07.044
9. Chandra G.R., Rekha K.Ch.C., Varshitha K., Sravani D., Vadlamudi V. HoloComm: An Augmented Reality – Based Public Information and Navigation System. *International Journal for Research in Science & Advanced Technologies*. 2026;26(4):532–536. DOI:10.65726/ijrsat.2026.V26.I04.22. EDN:GKFTBK
10. Pendit U.C., Zaibon S.B., Bakar J.A.A. Conceptual model of mobile augmented reality for cultural heritage site towards enjoyable informal learning aspect. *Jurnal Teknologi*. 2025;77:29. DOI:10.11113/jt.v77.684
11. Lv Z., Lloret J., Song H. Internet of Things and augmented reality in the age of 5 G. *Computer Communications*. 2020;164: 158–161. DOI:10.1016/j.comcom.2020.08.019. EDN:TJEGNO
12. Aguero M., Maharjan D., del Pilar Rodriguez M., Mascarenas D.D.L., Moreu F. Design and Implementation of a Connection between Augmented Reality and Sensors. *Robotics*. 2020;9(1):3. DOI:10.3390/robotics9010003
13. Sheloukhin O.I., Osin A.V., Smolsky S.M. *Self-Similarity and Fractals: Telecommunication Applications*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2008. 368 p. (in Russ.)
14. Rec. ITU-T P.910. *Subjective video quality assessment methods for multimedia applications*. 2023.

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 19.05.2026


The article was submitted 24.03.2026; approved after reviewing 20.04.2026; accepted for publication 19.05.2026

Информация об авторах:

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>

СТЕРЛИКОВ
Артём Дмитриевич

ведущий специалист группы планирования научных исследований и аналитики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0009-2895-3130>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61>

EDN:FSGGME



Модель и метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя

✉ Александр Владимирович Росляков, a.roslyakov@psuti.ru

✉ Вячеслав Васильевич Герасимов, v.gerasimov@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается математическая модель и аналитический метод получения верхних граничных оценок сквозных задержек трафика eCPRI среднего приоритета в переднем транспортном сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet сетей 4G / 5G с использованием кредитного формирователя.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в связи с бурным развитием перспективных инфокоммуникационных приложений Индустрии 4.0 возникла необходимость в передаче разнообразного трафика, требующего высокого качества обслуживания. Для этих целей можно использовать транспортные возможности сетей 4G / 5G, однако при условии, что их сегмент Fronthaul реализован на базе перспективной технологии чувствительных ко времени сетей TSN Ethernet. Для обслуживания аperiodического трафика eCPRI в сети TSN для повышения пропускной способности Fronthaul целесообразно использовать специальный кредитный формирователь трафика CBS. Требования к граничным задержкам передачи различного вида трафика Fronthaul регламентируются стандартом IEEE 802.1CM, однако в нем отсутствует методика их определения.

Цель исследования заключается в разработке модели и метода оценки граничных задержек в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet в сетях 4G / 5G с использованием теории сетевого исчисления.

Методы включают получение аналитических выражений для кривых поступления трафика сегмента Fronthaul и кривых его обслуживания в коммутируемой сети TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя трафика CBS на основе базовых подходов теории сетевого исчисления.

Результаты. Разработана модель обслуживания разнородного трафика eCPRI в сегменте Fronthaul на базе TSN Ethernet. Предложен метод получения граничных значений задержек для трафика среднего приоритета, обслуживаемого кредитным формирователем CBS, на базе теории сетевого исчисления.

Новизна. Проведенное исследование является первой попыткой получения методики оценки верхних граничных задержек трафика eCPRI среднего приоритета, учитывающей требования IEEE 802.1CM.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели и метода оценки граничных задержек трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul сетей 4G / 5G на базе технологии TSN Ethernet, обслуживаемого с использованием кредитного формирователя, с применением математического аппарата теории сетевого исчисления.

Ключевые слова: сегмент Fronthaul сетей 4G / 5G, трафик среднего приоритета eCPRI, сеть TSN Ethernet, кредитный формирователь CBS, теория сетевого исчисления, сквозные задержки

Ссылка для цитирования: Росляков А.В., Герасимов В.В. Модель и метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 44–61. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61. EDN:FSGGME


Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61>

EDN:FSGGME

Model and Worst-Case End-to-End Traffic Delay Analysis in the Fronthaul Segment of 4G / 5G Networks Based on TSN Ethernet Technology Using Credit Based Shaper

 Alexander V. Roslyakov[✉], a.roslyakov@psuti.ru

 Vyacheslav V. Gerasimov, v.gerasimov@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

This article examines a mathematical model and an analytical method for obtaining upper bound estimates of end-to-end delays of medium-priority eCPRI traffic in the Fronthaul based on TSN Ethernet technology of 4G/5G networks using a credit shaper.

The relevance of this study stems from the fact that the rapid development of promising Industry 4.0 infocommunication applications has necessitated the transmission of diverse traffic requiring high quality of service. For these purposes, the transport capabilities of 4G/5G networks can be utilized, provided that their fronthaul segment is implemented using the advanced technology of time-sensitive TSN Ethernet networks. To service aperiodic eCPRI traffic in a TSN network, it is advisable to use a dedicated credit-based traffic shaper (CBS) to increase fronthaul throughput. Requirements for the boundary delays for the transmission of various types of fronthaul traffic are regulated by the IEEE 802.1CM standard; however, it lacks a methodology for determining them.

The aim of this study to develop a model and method for estimating boundary delays in the Fronthaul segment based on TSN Ethernet technology in 4G/5G networks using the theory of network calculus.

Methods include deriving analytical expressions for the Fronthaul traffic arrival curves and its service curves in the TSN Ethernet network using the CBS credit traffic shaper based on the basic approaches of network calculus theory.

Results. A model for serving heterogeneous eCPRI traffic in the Fronthaul based on TSN Ethernet was developed. A method for obtaining worst-case delay for CBS medium-priority traffic the was proposed, based on network calculus.

Scientific novelty. The conducted study is the first attempt to obtain a methodology for estimating upper bounds on end-to-end delays of medium priority eCPRI traffic, taking into account the requirements of IEEE 802.1CM.

The theoretical significance of the work lies in the development of a mathematical model and a method for estimating the boundary delays of medium-priority traffic in the Fronthaul segment of 4G/5G networks based on TSN Ethernet technology, served using a credit generator, using the mathematical apparatus of network calculus theory.

Keywords: Fronthaul transport segment of 4G/5G mobile networks, medium priority traffic of the eCPRI radio interface, Time-Sensitive Networking, Credit Based Shaper, Network Calculus theory, end-to-end delays

For citation: Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Model and Worst-Case End-to-End Traffic Delay Analysis in the Fronthaul Segment of 4G/5G Networks Based on TSN Ethernet Technology Using Credit Based Shaper. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):44–61. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61. EDN:FSGGME

Введение

Согласно Стратегии развития отрасли связи в России, принятой в 2023 г. [1], до 2030 г. должно быть разработано и внедрено отечественное оборудование мобильных сетей 4G на базе стандарта

LTE, а в дальнейшем – оборудование, которое поддерживает перспективные технологии стандартов 5G и 6G. Для реализации этих амбициозных планов в Стратегии запланировано формирование необходимых научно-технологических заделов и отече-

ственной нормативно-технической базы, способствующих успешному решению поставленных задач развития отечественных сетей мобильной связи.

В сетях поколений 4G / 5G перспективной концепцией построения сети радиодоступа RAN (аббр. от англ. Radio Access Network) является централизованная / облачная архитектура C-RAN (аббр. от англ. Centralized / Cloud RAN), в которой вся инфраструктура разделена на ряд функциональных блоков (рисунок 1). Эти блоки взаимодействуют между собой через транспортную сеть, состоящую в общем случае из трех сегментов, называемых обобщенно xHaul [2–6]. Непосредственно с базовыми станциями в сетях 4G / 5G или в терминологии IEEE – радиоустройствами RE/eRE (аббр. от англ. Radio Equipment), связан передний сегмент (Fronthaul), который подключает их к управляющему устройству REC/eREC (аббр. от англ. Radio Equipment Control), выполняющему основную обработку информации. Данные в сегменте Fronthaul передаются с использованием стандартных радиоинтерфейсов CPRI/eCPRI (аббр. от англ. Common Public Radio Interface). Интерфейс eCPRI за счет пакетной передачи данных обеспечивает большую эффективность, гибкость и масштабируемость сети радиодоступа, поэтому он используется в сетях 5G, а также планируется в сетях 6G.

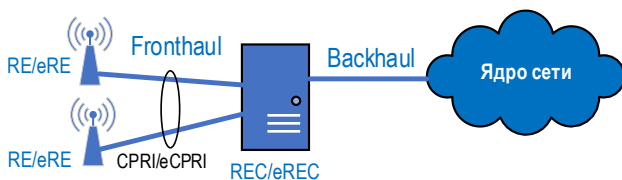


Рис. 1. Централизованная / облачная C-RAN

Fig. 1. Centralized / Cloud Radio Access Network

Для связи RE/eRE и REC/eREC в сегменте Fronthaul сетей 4G обычно используются физические соединения «точка-точка» на базе оптоволоконных кабелей. В сетях 5G трафик C-RAN дополнился разнообразным трафиком перспективных инфокоммуникационных приложений (системы промышленной автоматизации Индустрии 4.0, интеллектуальные транспортные системы, тактильный Интернет, промышленный Интернет вещей, киберфизические системы, беспилотный транспорт и др.). Этот трафик предъявляет жесткие требования к характеристикам передачи данных в мобильной сети, что потребовало пересмотра принципов построения сегмента Fronthaul. В проводных сетях (прежде всего бортовых и промышленных) в последние годы активно используется технология чувствительных ко времени сетей TSN (аббр. от англ. Time-Sensitive Networking) [7–15], которая является модификацией стандартной технологии Ethernet. Основным отличием TSN является воз-

можность передачи трафика различного вида с соблюдением необходимых гарантий качества обслуживания – задержки, джиттера, синхронизации, надежности доставки информации. С учетом этого TSN является перспективной технологией для реализации сегмента Fronthaul в сетях 5G / 6G. В стандарте IEEE 802.1CM [16] приведены принципы построения сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet, определены нормы на сквозные задержки трафика eCPRI различных приоритетов, однако в документе отсутствует методика определения этих задержек.

Метод определения граничных задержек в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet с использованием временного формирователя TAS (аббр. от англ. Time-Aware Shaping) представлен в работах [17, 18]. Однако формирователь TAS реализует периодическое временное расписание GCL (аббр. от англ. Gate Control List), в котором зафиксированы точные моменты открытия и закрытия выходных портов коммутатора для передачи трафика соответствующего приоритета. Такая схема работы сети TSN Ethernet лучше всего подходит для передачи периодического трафика и трафика, требующего строгих гарантий границ задержки. Поэтому временной формирователь TAS целесообразно использовать для обслуживания трафика eCPRI высшего приоритета – пользовательских данных быстрого типа, для которых, согласно профилю IEEE 802.1CM, максимальная сквозная односторонняя задержка не должна превышать 100, 200 или 500 мкс в зависимости от класса трафика [16]. Для трафика среднего приоритета (медленные пользовательские данные и быстрые данные управления и обслуживания C&M (аббр. от англ. Control and Management)) и низшего приоритета (медленные данные C&M) нормы на сквозные задержки менее жесткие – 1 и 100 мс соответственно. Кроме того, в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet может передаваться трафик различных сторонних инфокоммуникационных приложений, использующих сети мобильной связи 4G / 5G как транспорт с гарантированной передачей данных. Этот трафик чаще всего является аperiodическим, и передача его с применением временного формирователя TAS приведет к неэффективному использованию полосы пропускания сегмента Fronthaul [19]. Поэтому при передаче трафика eCPRI среднего приоритета и трафика сторонних инфокоммуникационных приложений целесообразно использовать формирователь трафика на основе кредита CBS (аббр. от англ. Credit Based Shaping), описанный в стандарте IEEE 802.1Qav [20], который позволяет обеспечить гибкую загрузку сети радиодоступа. В статье приведены базовые принципы реализации Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet, предлагается модель узла сегмента на базе теории сетевого исчисления NC

(*аббр. от англ. Network Calculus*) и разработан метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul с использованием кредитного формирователя CBS.

Реализация сегмента Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet

Сеть TSN Ethernet поддерживает передачу трафика трех разных классов: с привязкой ко времени ТТ (*аббр. от англ. Time Triggered*), аудио-видео моста AVB (*аббр. от англ. Audio-Video Bridging*) и лучшее из возможного BE (*аббр. от англ. Best Effort*) [8]. При использовании технологии TSN Ethernet для реализации сегмента Fronthaul в мобильных сетях 5G эти три класса трафика TSN можно соотносить со тремя типами трафика интерфейса eCPRI: ТТ, AVB, BE (рисунок 2). Трафик ТТ – трафик высшего приоритета (ВП), соответствующий пользовательским данным данного быстрого типа eCPRI и обслуживаемый с использованием временного формирователя TAS [21] в соответствии с расписанием GCL. Трафик AVB – трафик среднего приоритета (СП), соответствующий медленным пользовательским данным и быстрым данным C&M eCPRI и обслуживаемый с использованием кредитного формирователя CBS [20]. Чаще всего трафик AVB разбивают на два приоритета, которые называют классом А (высший приоритет) и классом В (низший приоритет). По аналогии с такой классификацией трафик медленных пользовательских данных eCPRI в дальнейшем будем обозначать индексом СП1, а трафик быстрых данных C&M – СП2. Трафик BE – трафик низшего приоритета (НП), соответствующий медленным данным C&M eCPRI и обслуживаемый с использованием остаточного принципа полосы пропускания кадра Ethernet.

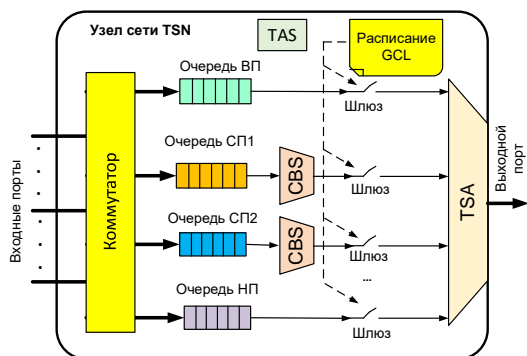


Рис. 2. Схема узла сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet
 Fig. 2. Schematic Diagram of a TSN Ethernet-Based Fronthaul Segment Node

Логично использовать в качестве модели узла TSN Ethernet (конечной точки или коммутатора) одноканальную систему массового обслуживания (СМО), на которую поступают агрегированные по-

токи трафика интерфейса eCPRI четырех приоритетов – ВП, СП1, СП2 и НП (рисунок 3) [17].

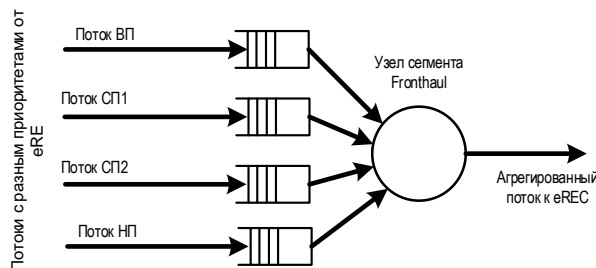


Рис. 3. Модель узла сегмента Fronthaul сетей 4G / 5G в виде СМО

Fig. 3. Model of a 4G / 5G Network Fronthaul Segment Node as a System with Queues

Для получения оценок верхних границ задержек заявок в СМО, моделирующей работу сегмента Fronthaul, необходимо знание функций распределения интервалов времени между пакетами в потоках разнородного трафика интерфейса eCPRI и длительностей обслуживания этих потоков в сегменте. Чаще всего такие распределения имеют сложный характер, получить их аналитическое описание, используя математический аппарат теории массового обслуживания [22], весьма затруднительно. При этом анализ характеристик СМО общего вида G/G/1 возможен только аппроксимационными методами с получением лишь средних значений времени ожидания заявок [23].

Поэтому для определения граничных оценок задержек в любых СМО с ожиданием в наибольшей степени подходит теория Network Calculus [24–29], которая оперирует детерминированными параметрами входного потока заявок и исследуемой СМО и позволяет достаточно просто получить граничные оценки качества функционирования сетевой модели. Для практического применения теории Network Calculus необходимо знать функции, описывающие входной поток трафика и обслуживающее устройство, называемые кривыми поступления и обслуживания соответственно.

Базовые определения теории Network Calculus

Профессор Р. Круз в 1991 г. в двух своих работах [24, 25] сформулировал основные принципы теории детерминированного Network Calculus. В ее основе лежит математический аппарат идемпотентной (min,+)-алгебры [30]. Эта алгебра включает всего две операции (диоид) и, в отличие от традиционной алгебры, в ней идемпотентное сложение (обозначается как \wedge) определяется вычислением инфимума $a \wedge b := \inf(a, b)$, а операция идемпотентного умножения является классической операцией сложения $a \times b := a + b$. Далее приведены несколько определений, которые необходимы для понятия основных положений теории Network Calculus.

Определение 1. (Min,+)-свертка

Для возрастающих в широком смысле функций $x(t)$ и $y(t)$ их (min,+)-свертка определяется выражением:

$$x(t) \otimes y(t) = \inf_{0 < \tau < t} \{x(t + \tau) + y(\tau)\}, \quad (1)$$

где \inf – инфимум (нижняя граница) функции.

Определение 2. (Min,+)-обратная свертка

(Min,+)-обратная свертка функций $x(t)$ и $y(t)$ равна:

$$x(t) \oslash y(t) = \sup_{\tau \geq 0} \{x(t + \tau) + y(\tau)\},$$

где \sup – супремум (верхняя граница) функции.

Определение 3. Кривая поступления

Входной поток $A(t)$ ограничен сверху возрастающей в широком смысле функцией – кривой поступления $\alpha(t)$ тогда и только тогда, когда для всех $\tau \leq t$:

$$A(t) - A(\tau) \leq \alpha(t - \tau). \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что в течение любого промежутка времени $\Delta t = t - \tau$ количество данных в потоке $A(\Delta t)$ ограничено величиной $\alpha(\Delta t)$ (рисунок 4).

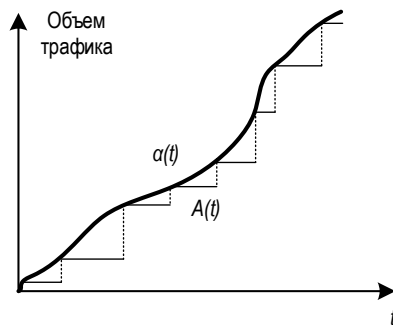


Рис. 4. Кривая поступления $\alpha(t)$ для входящего потока $A(t)$

Fig. 4. Arrival Curve $\alpha(t)$ for the Input Flow $A(t)$

Определение 4. Кривая обслуживания

Обслуживающее устройство реализует для входящего потока $A(t)$ с кривой поступления $\alpha(t)$ кривую обслуживания $\beta(t)$, если $\beta(t)$ является возрастающей в широком смысле функцией и выходной поток удовлетворяет неравенству $D(t) \geq A(t) \otimes \beta(t)$ (рисунок 5).

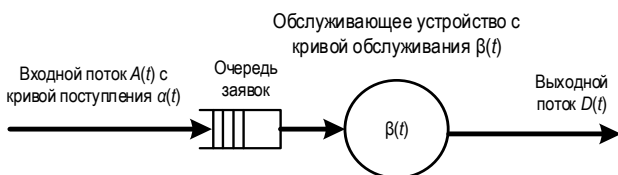


Рис. 5. Кривая обслуживания $\beta(t)$ и выходной поток $D(t)$

Fig. 5. Service Curve $\beta(t)$ and Output Flow $D(t)$

Одним из главных результатов теории Network Calculus является возможность определения верхней границы задержки потока трафика $w(t)$, кото-

рая в СМО с кривой поступления $\alpha(t)$ и кривой обслуживания $\beta(t)$ определяется выражением [24]:

$$w(t) = \sup_{t \geq 0} \{\inf\{\tau \geq 0: \alpha(t) < \beta(t + \tau)\}\}. \quad (3)$$

На графике кривых поступления и обслуживания (рисунок 6) максимальное горизонтальное расстояние между этими кривыми определяет верхнюю границу задержки потока $w(t)$ согласно (3), в то время как максимальное вертикальное расстояние $q(t)$ показывает наибольшую загрузку системы (число заявок в очереди и обслуживающем устройстве) в момент времени t .

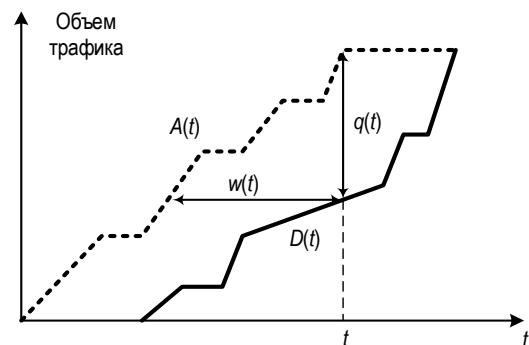


Рис. 6. Определение задержки и загрузки системы обслуживания

Fig. 6. Determination of Delay and Service System Loading

Более подробную информацию о теории Network Calculus можно найти в [29].

Базовые принципы работы кредитного формирователя трафика CBS

Критичные данные eCPRI в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet передаются с использованием временного формирователя TAS (стандарт IEEE 802.1Qbv-2015 [21]), который обеспечивает низкую и гарантированную сквозную задержку. Однако передача мультимедийного потокового трафика не требует от сети столь строгих гарантий задержки, гораздо важнее обеспечить непрерывный поток аудио- и видеокладов и более равномерную пересылку данных. Для передачи таких потоков трафика, называемых в стандарте IEEE 802.1Qav [20] AVB, в сети TSN Ethernet используется формирователь на основе кредита CBS, который сглаживает выбросы трафика и равномерно распределяет кадры во времени. В формирователе CBS для каждого потока организуется своя очередь и ее состояние описывается в каждый момент времени определенной условной величиной, называемой кредитом. Когда кадры ждут передачи в очереди или когда нет сообщений и кредит отрицательный, то его величина увеличивается с настраиваемой скоростью V^{up} (в стандарте IEEE 802.1 Qbu для нее используется обозначение $idSl$ (idle slope)). Во время передачи кадра или последовательности кадров (в зависимости от того, сколько кредита

было накоплено ранее) величина кредита уменьшается с настраиваемой скоростью V_i^{down} (в стандарте IEEE 802.1 Qbv используется обозначение *sdSl* (send slope)). При этом передача кадра из очереди возможна только в том случае, если ее кредит неотрицательный. В то же время, если в очереди нет сообщений и кредит положительный, то он сбрасывается в ноль.

Скорость возрастания кредита V_i^{up} i -й очереди в формирователе CBS пропорциональна доле полосы пропускания ΔB_i , выделяемой i -му классу трафика из общей полосы пропускания R выходного порта коммутатора [20]:

$$V_i^{\text{up}} = R \cdot \Delta B_i. \quad (4)$$

Величина скорости убывания кредита V_i^{down} всегда отрицательная и определяется из уравнения:

$$V_i^{\text{down}} = V_i^{\text{up}} - R. \quad (5)$$

В соответствии со стандартом IEEE 802.1Qav, в кредитном формирователе выделяют два вида трафика: класс *A* (приоритет 5) и класс *B* (приоритет 4). Трафик класса *A* допускает задержки не более 2 мс при максимальном периоде передачи 125 мкс. Для трафика класса *B* задержки не должны превышать 50 мс при максимальном периоде передачи 250 мкс [20]. Причем оба класса трафика не должны превышать предустановленную максимальную долю занимаемой полосы пропускания (для аудио- и видеоприложений не более 75 %). Для защиты трафика *BE* от блокирования передачи последовательными кадрами более высокоприоритетного трафика классов *A* и *B* формирователь CBS не разрешает передачу трафика, если его кредит отрицательный.

Приоритетные очереди в TSN обслуживаются с помощью двух способов: без прерывания и с прерыванием обслуживания ранее поступивших кадров. Обычный коммутируемый Ethernet использует приоритетную очередь без прерывания, когда критичный ко времени кадр не обрабатывается сразу после его прибытия, если обрабатывается некритичный ко времени кадр. Он помещается в начало очереди и обрабатывается как можно быстрее после передачи некритичного кадра. Таким образом, критичный кадр будет получать задержку в зависимости от объема некритичного трафика. Для уменьшения задержки в стандарте IEEE 802.1Qbv [31] используется очередь с прерыванием. Она не только минимизирует задержку для критичных кадров, но и обеспечивает защиту для некритичных кадров. Если критичный кадр получен во время обработки некритичного кадра, его обработка прекращается, и она продолжается после завершения обработки критичного кадра. Некритичный кадр может быть прерван несколько раз, пока

не будет достигнуто ограничение по количеству прерываний. Если стандарт IEEE 802.1Qbv предотвращает слишком долгое обслуживание некритичных кадров, то стандарт IEEE 802.1Qbv уменьшает задержку передачи для критичных кадров. Например, если передается кадр с MTU (*аббр. от англ. Maximum Transmission Unit*) в 1500 байт, то без прерывания он может заблокировать порт 1 Гбит/с примерно на 12,5 мкс. Однако, если используется прерывание кадра, то максимальное время блокировки порта – не более 1 мкс.

Приоритетное прерывание передачи кадра, определенное в стандартах IEEE 802.1Qbv и IEEE 802.3br [32], позволяет также уменьшить величину защитного интервала в кадре TSN Ethernet, который выбирается равным наибольшему возможному размеру фрагмента, а не всего конкурирующего кадра. При этом размер фрагмента кадра в результате прерывания его передачи должен быть не менее 64 байт.

В формирователе TAS существует ряд ограничений, которые необходимо соблюдать для обеспечения осуществимости расписания GCL [8]. Например, когда соответствующий шлюз для трафика ВП открыт, остальные шлюзы для трафика СП1, СП2 или НП закрыты, и наоборот. На рисунке 7 изображены две конечные точки ES1 и ES2 и коммутатор SW, для которых показаны соответствующие расписания. В моменты времени t_2 и t_3 шлюз для очереди ВП в коммутаторе SW открыт, в то время как шлюзы для очередей СП1 и СП2 закрыты. В течение этого периода времени передача кадров трафика СП и НП запрещена до тех пор, пока шлюз ВП не будет открыт, а соответствующие шлюзы СП и НП не будут открыты с момента времени t_4 . Таким образом, трафик СП и НП не может передаваться в интервалах времени, зарезервированных для кадров ВП.

Однако, если кадры СП или НП уже находятся на передаче в начале временного окна, запланированного для трафика ВП (рисунок 8а), кадр трафика ВП может быть задержан. В сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet используются два режима интеграции трафика разных приоритетов. Один из них определен в стандарте IEEE 802.1Qbv [21] – это непрерываемый защитный интервал (ЗИ) перед каждым временным окном кадра ВП, как показано на рисунке 8б. ЗИ имеет длину кадра максимального размера, который может препятствовать передаче трафика ВП, что в худшем случае составляет максимальный размер передаваемого блока данных MTU Ethernet в 1500 байт. В течение ЗИ шлюзы, связанные с трафиком СП и НП, закрываются заранее, чтобы гарантировать, что выходной порт свободен, когда очередь ВП открыта для передачи. Режим интеграции без прерывания приведет к потере полосы пропускания из-за ЗИ, но он гарантирует отсутствие задержек для трафика ВП.

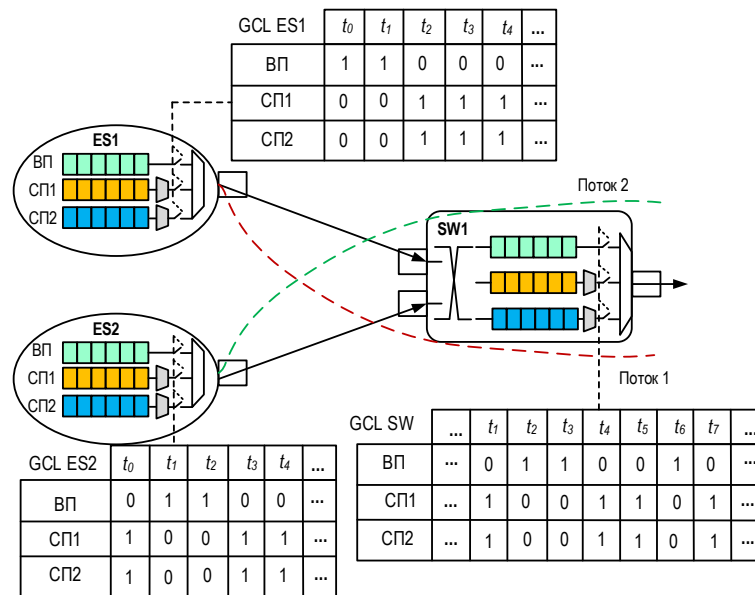


Рис. 7. Примеры расписаний GCL в сети TSN Ethernet

Fig. 7. GCL Examples for TSN Ethernet Network

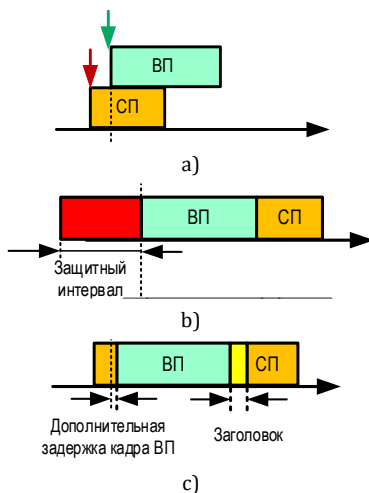


Рис. 8. Модели интеграции трафика ВП и СП: а) поступление кадров ВП и СП; б) режим без прерывания; в) режим с прерыванием

Fig. 8. Models of Integration of HP and MP Traffic: a) Arrival of HP and MP Frames; b) Mode Without Interruption; c) Mode with Interruption

Другой режим интеграции – это режим с прерыванием кадров, определенный в IEEE 802.1Qbu [31], как показано на рисунке 8с. В этом случае кадр СП1 или СП2 прерывается кадром ВП, и его передача возобновляется с момента остановки после завершения передачи кадра ВП. Когда шлюз для очереди ВП готов к открытию, соответствующий шлюз для прерываемого кадра СП, который уже находится в процессе передачи, открывается на время, необходимое для завершения передачи фрагмента кадра СП перед открытием очереди ВП. При возобновлении передачи оставшийся фрагмент кадра СП будет включать дополнительную служебную информацию в виде соответствующего заголовка, предназначенного для сбора фрагментов кадра СП в ко-

нечной точке назначения. По сравнению с ЗИ, дополнительные задержки могут быть незначительными, поэтому использование приоритетного прерывания уменьшает задержку трафика СП и увеличивает пропускную способность. Однако следует учитывать, что для трафика ВП это приведет к джиттеру задержки.

В свою очередь, порядок передачи потоков трафика СП в сегменте Fronthaul дополнительно определяется формирователем на основе кредитов CBS, цель которого – предотвратить большие задержки потоков с более низким приоритетом. Поэтому передача кадра СП, находящегося в очереди, разрешена, если одновременно выполняются три условия [19]:

- 1) шлюз данной очереди СП_i открыт;
- 2) формирователь CBS разрешает передачу этого потока СП_i;
- 3) нет других передаваемых кадров СП_i с более высоким приоритетом.

Каждый класс трафика СП_i имеет связанное с ним значение кредита. Передача кадра СП_i невозможна при отрицательной величине его кредита. В начале работы кредиты всех потоков СП_i устанавливаются в ноль. В дальнейшем, если передается кадр СП_i, то кредит его очереди уменьшается со скоростью $V_{СПi}^{down}$ ($i \in \{1, 2\}$) и увеличивается со скоростью $V_{СПi}^{up}$ ($i \in \{1, 2\}$), когда кадр СП_i ожидает передачи в очереди. Если очередь СП_i пуста, то ее кредит сбрасывается в ноль; в противном случае он увеличивается со скоростью данного потока до нуля. То же самое происходит, если шлюз для соответствующей очереди трафика СП_i открыт, а кадров для передачи нет. Чтобы избежать переполнения кредита, он остается неизменным, когда соответствующий шлюз СП_i закрыт и передается трафик ВП.

На рисунке 9 показан пример работы кредитного формирователя CBS с кадрами TSN Ethernet ВП, СП и НП в сегменте Fronthaul соответственно в двух режимах интеграции – без прерывания кадров (см. рисунок 9а) и с прерыванием (рисунок 9б). Прямоугольники сверху временных осей отображают длительности передачи кадров, а стрелки сверху вниз – моменты времени поступления этих кадров. Ломаные линии на временных осях показывают изменение величины кредита для соответствующего класса СП i .

На рисунке 9а показан режим работы кредитного формирователя CBS без прерывания кадров. В момент времени t_0 поступает кадр СП1-1, но в это время в звене TSN Ethernet еще передается кадр НП. Из-за отсутствия прерывания кадров НП кадр СП1-1 будет ждать окончания передачи кадра НП и его кредит увеличивается со скоростью $V_{СП1}^{up}$. В момент времени t_1 передача кадра НП завершается, однако шлюзы потоков СП будут еще закрыты на время ЗИ для гарантий передачи трафика ВП и недостаточного интервала времени (из-за ЗИ) для передачи всего кадра СП1-1. Следовательно, кредит СП1 остается неизменным в течение интервала $[t_1, t_4]$, когда шлюзы СП закрыты. Даже если кадр СП2-1 поступает в момент времени t_2 , его кредит также должен

быть неизменен (в рассматриваемом примере он равен нулю). С момента времени t_4 , поскольку шлюз для очереди ВП закрыт, и СП1 имеет более высокий приоритет, чем СП2, разрешено передавать кадр СП1-1. Кредиты СП1 и СП2 уменьшаются и увеличиваются со скоростями $V_{СП1}^{down}$ и $V_{СП2}^{up}$ соответственно. Во время передачи кадра СП1-1, следующий кадр СП1-2 помещается в очередь СП1 в момент времени t_5 . В момент времени t_6 , когда завершается передача кадра СП1-1, два кадра СП1-2 и СП2-1 ожидают передачи. Но кредит СП1 в этот момент отрицательный, поэтому кадр СП1-2 не может передаваться, и кадр СП2-1 получает разрешение на передачу. По окончании передачи кадра СП2-1 начинается передача кадра СП1-2, поскольку его кредит увеличился до значения, превышающего 0. На рисунке 9б моменты поступления всех кадров такие же, как и на рисунке 9а. Однако из-за режима интеграции с прерыванием кадр ВП задерживается на время от t_3 до t_4 , а к оставшемуся фрагменту кадра СП1-1 добавляется служебная информация для сбора фрагментов. Кроме того, видно, что передача кадров СП на рисунке 9б завершается раньше, чем на рисунке 9а, хотя передача кадра ВП несколько задерживается.

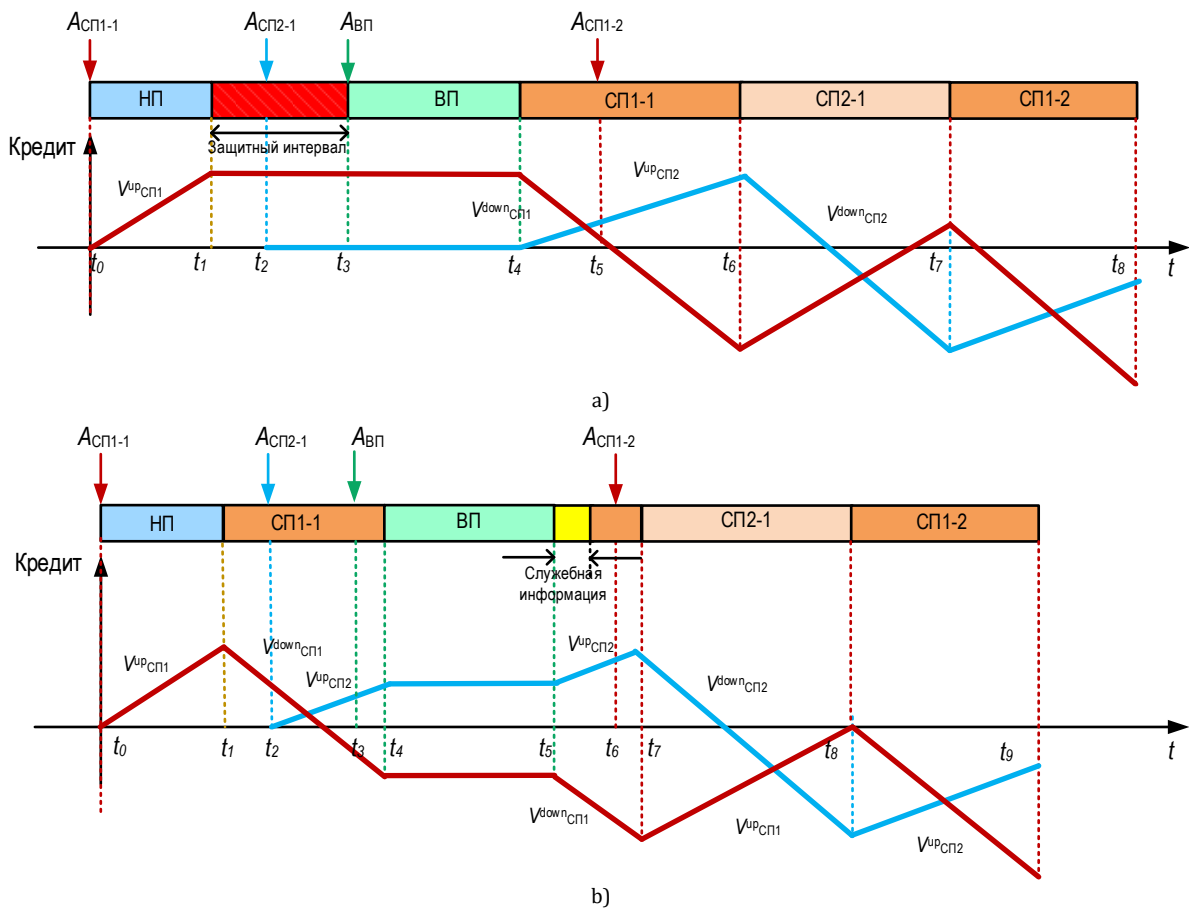


Рис. 9. Работа формирователя CBS: а) без прерывания; б) с прерыванием
 Fig. 9. Credit Base Shaper Operation: a) without Interruption; b) with Interruption

Выбор параметров кредитного формирователя трафика CBS

Как было указано выше, в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet передача трафика СП связана не только с состояниями шлюзов временного формирователя TAS, но и с работой кредитного формирователя CBS. Хотя передача кадров ВП как в режиме с прерыванием, так и в режиме без прерывания задерживает трафик СП, кредиты для обоих классов СП в эти периоды остаются неизменными. Следовательно, можно считать, что кредиты потоков трафика СП сегмента Fronthaul не зависят от трафика ВП и их можно анализировать изолированно. Фактически величина кредита связана только с передачей и задержкой кадров СП_{*i*} сегмента Fronthaul во время открытия соответствующего шлюза СП_{*i*}, а также настройками скоростей уменьшения $V_{СПi}^{down}$ и увеличения $V_{СПi}^{up}$ кредита для каждого *i*-го класса трафика, которые являются параметрами конфигурации, задаваемыми на этапе планирования и конфигурирования сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet.

В стандарте IEEE 802.1Qbv [22] приведено только соотношение между скоростями $V_{СПi}^{down}$ и $V_{СПi}^{up}$ в виде:

$$V_{СПi}^{down} = V_{СПi}^{up} - R, \quad (6)$$

где R – скорость выходного порта TSN Ethernet.

Однако в общем случае возможны любые значения скоростей изменения кредитов в формирователе CBS для разных типов трафика сегмента Fronthaul. Поэтому следует учитывать, что при определенных параметрах трафика потоков СП1 и СП2 перегрузка трафика может вызвать переполнение кредита и сбой функции защиты от недостаточной полосы пропускания в кредитном формирователе CBS, что не должно допускаться. Таким образом, необходимо ограничить скорости изменения кредитов $V_{СПi}^{down}$ и $V_{СПi}^{up}$, чтобы убедиться, что кредит потока определенного класса трафика СП ограничен. Поскольку поток СП1 имеет более высокий приоритет, его кредит должен уменьшаться при соответствующей передаче кадра, как только кредит СП1 станет больше нуля в конце передачи кадра с более низким приоритетом, и увеличиваться, когда кредит СП1 станет меньше нуля в конце передачи кадра СП1.

Следовательно, для любых скоростей $V_{СП1}^{down}$ и $V_{СП1}^{up}$ кредит СП1 должен находиться в следующих пределах:

$$L_{СП1}^{max} \cdot \frac{V_{СП1}^{down}}{R} \leq C_{СП1} \leq \max\{L_{СП2}^{max}, L_{НП}^{max}\} \cdot \frac{V_{СП1}^{up}}{R}, \quad (7)$$

где $L_{СПi}^{max}$ – максимальный размер кадра потока *i*-го среднего приоритета; $L_{НП}^{max}$ – максимальный размер кадра потока низшего приоритета; $C_{СП1}$ – кредит потока СП1.

По аналогии с (7) границы изменения кредита потока СП2 можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} L_{СП2}^{max} \cdot \frac{V_{СП2}^{down}}{R} \leq C_{СП2} \leq \\ \leq \left(\frac{L_{СП2}^{max} + L_{СП1}^{max}}{R} - L_n^{max} \cdot \frac{V_{СП1}^{up}}{V_{СП1}^{down} \cdot R} \right) \cdot V_{СП2}^{up}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $L_n^{max} = \max\{L_{СП2}^{max}, L_{НП}^{max}\}$.

Очевидно следующее ограничение, при котором кредит потока СП2 не переполняется:

$$V_{СП1}^{down} \cdot V_{СП2}^{down} \geq V_{СП1}^{up} \cdot V_{СП2}^{up}. \quad (9)$$

Кривые поступления трафика сегмента Fronthaul

Определим кривые поступления для трафика классов СП1 и СП2 с учетом наличия трафика ВП в выходном порту TSN Ethernet в режимах без прерывания и с прерыванием обслуживания кадров соответственно. Начнем с определения агрегированной кривой поступления, учитывающей влияние трафика ВП, поскольку оставшееся от него время в кадре TSN Ethernet доступно для обслуживания трафика СП. При использовании временного формирователя TAS агрегированная кривая поступления трафика ВП получается путем суммирования кривых поступления каждого отдельного периодического потока ВП, смещенного в кадре TSN Ethernet на соответствующие интервалы времени [33]. Однако временное расписание GCL управляет состояниями шлюзов для очереди потоков ВП, а не отдельных кадров ВП. Если конечные устройства в сети TSN Ethernet не конфигурируются централизованно [34], то потоки ВП могут потерять необходимую периодичность передачи на всем маршруте в сети TSN Ethernet. Будем учитывать влияние трафика ВП на агрегированные кривые поступления трафика на выходной порт на основе запланированных в GCL временных окон для передачи трафика ВП. Кроме того, в агрегированной кривой поступления трафика ВП будем учитывать величину ЗИ для режима без прерывания обслуживания, а также ситуации конкуренции кадров трафика разных приоритетов для режима с прерыванием обслуживания кадров более низких приоритетов.

В формирователе TAS расписание GCL для каждого выходного порта TSN Ethernet повторяется с соответствующим сверхциклом T_{GCL} . Следовательно, любое временное окно передачи трафика ВП повторяется циклически в T_{GCL} . При известном GCL выходного порта можно определить конечное число окон N для передачи трафика ВП в сверхцикле T_{GCL} . Например, на рисунке 10 оно равно 3. Кроме того, из расписания известно, когда открывается шлюз ВП и как долго он находится в этом состоянии. Обозначим длину *i*-го временного окна трафика ВП в выходном порту как L_i ($i \in [0, N - 1]$), см. рисунок 10.

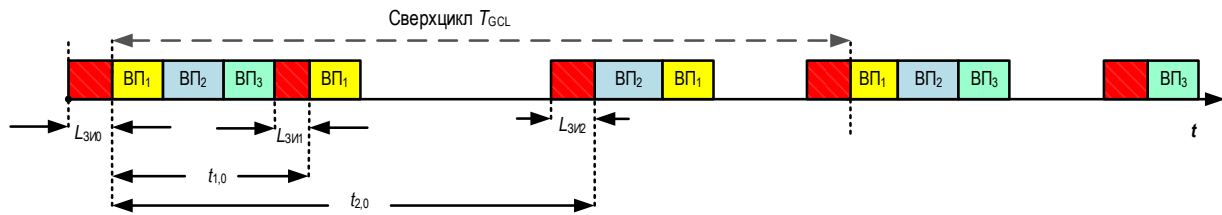


Рис. 10. Защитные интервалы после временных окон трафика ВП

Fig. 10. Guard Intervals after VP Traffic Time Windows

Более того, из расписания известны относительные смещения $\tau_{j,i}$ ($j \in [i + 1, i + N - 1]$) между временами начала i -го и j -го окон ВП, если взять i -е окно ВП в качестве точки отсчета. Например, на рисунке 10 интервалы времени $\tau_{1,0}$ и $\tau_{2,0}$ указывают смещения 1 и 2 кадров ВП соответственно относительно 0-го окна ВП длиной L_0 , взятого в качестве точки отсчета. Очевидно, что $\tau_{i,j} = 0$, если $j = i$.

Тогда возможная агрегированная кривая поступления трафика ВП может быть задана следующим образом [35]:

$$\alpha_{ВП,i}(t) = \sum_{j=1}^{i+N-1} L_j \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i}}{T_{GCL}} \right\rfloor, \quad (10)$$

где $L_j \cdot R$ – максимальное количество бит, которое может быть передано в выходном порту TSN Ethernet со скоростью R в течение окна передачи трафика ВП длиной L_j . Такая ступенчатая функция представляет собой верхнюю границу передачи трафика ВП в периодических временных окнах длиной L_j , а относительные смещения $\tau_{j,i}$ показывают соотношения между различными окнами трафика ВП в сверхцикле. Таким образом, выбирая различные окна трафика ВП в сверхцикле в качестве опорных и используя (10), можно получить набор возможных агрегированных кривых поступления $\alpha_{ВП,i}(t)$ ($i \in [0, N - 1]$). В худшем случае агрегированная кривая поступления трафика ВП в выходной порт является верхней огибающей всех возможных кривых поступления пересекающихся потоков ВП:

$$\alpha_{ВП}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \{ \alpha_{ВП,i}(t) \}. \quad (11)$$

Однако в режиме без прерывания ЗИ устанавливается перед каждым началом передачи трафика ВП. Тогда передача трафика СП не разрешена между началом ЗИ и началом окна передачи трафика ВП. В наихудшем случае величина защитного интервала $L_{ЗИ,i}$ перед i -м ($i \in [0, N - 1]$) окном пе-

редачи трафика ВП равна минимальному времени передачи кадров СП максимального размера, конкурирующих на выходном порту, и интервалу времени между двумя последовательными окнами трафика ВП.

Учитывая кривые поступления согласно (10) и (11), агрегированная кривая поступления трафика для конкурирующих потоков ВП и ЗИ в выходном порту TSN Ethernet в режиме без приоритета определяется по выражению (12), где множитель $(L_j + L_{ЗИ,j}) \cdot R$ учитывает добавление максимального количества бит, обусловленных j -й защитным интервалом, к максимальному количеству бит ВП-кадров, переданных в j -м окне передачи трафика ВП, которые вместе задерживают обслуживание трафика СП (рисунок 11а). Более того, из-за возможной разницы длин защитных интервалов расстояние между суммарными временными окнами «ЗИ + ВП» может измениться, что отражено в (12) через множитель $(L_j + L_{ЗИ,j})$.

В режиме с прерываниями передачи кадров, если передавался кадр СП и передача его была прервана кадром более высокого приоритета, при дальнейшей передаче оставшейся части кадра СП появляется дополнительная временная задержка, вызванная передачей служебной информации объемом $L_{СЛ}$, бит для восстановления прерванного кадра СП [34]. В наихудшем случае каждое окно трафика ВП прерывает кадр СП1 или СП2, как показано на рисунке 11b. Очевидно, что дополнительная задержка равна $L_{СЛ} \cdot R$ и ее можно рассматривать как следствие поступления более приоритетного условного трафика, вызывающего задержку трафика СП. Поскольку дополнительные задержки появляются только после каждого окна передачи трафика ВП, кривая поступления этого дополнительного условного трафика с учетом (10 и 11) может быть задана следующим выражением (13), где $T_{ВПj}$ – длительность временного окна передачи j -го трафика ВП.

$$\alpha_{ЗИ+ВП}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{i+N-1} (L_j + L_{ЗИ,j}) \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i} + L_{ЗИ,j} - L_{ЗИ,i}}{T_{GCL}} \right\rfloor \right\}. \quad (12)$$

$$\alpha_{СЛ}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \left\{ \sum_{j=i}^{i+N-1} L_{СЛ} \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i} - T_{ВПj}}{T_{GCL}} \right\rfloor \right\}. \quad (13)$$

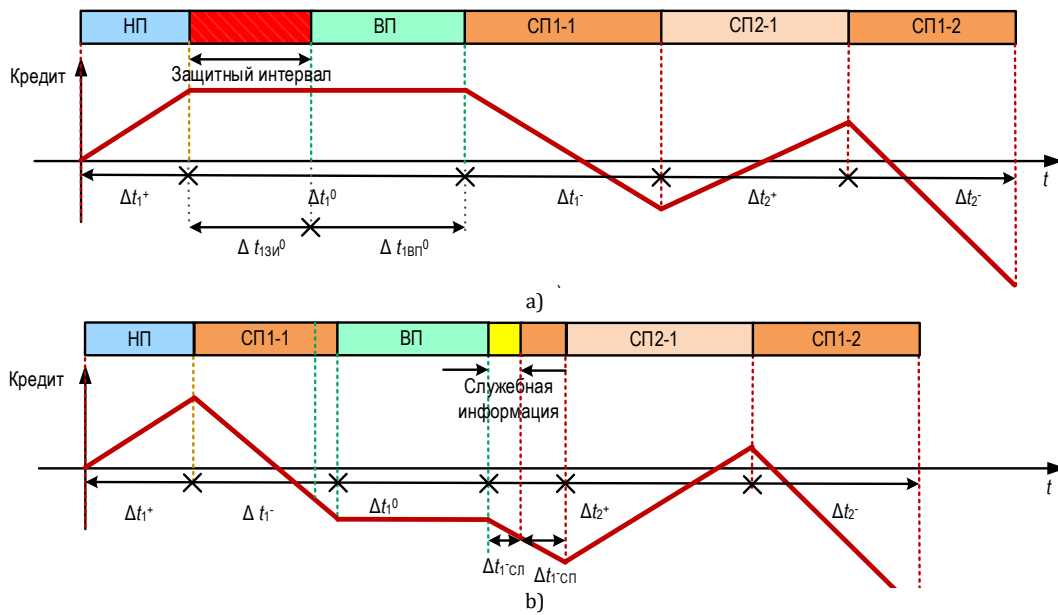


Рис. 11. Работа CBS в режимах: а) без прерывания; б) с прерыванием

Fig. 11. Credit Shaper's Work in Different Modes: a) without Interruption; b) with Interruption

Кривые обслуживания трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul

Независимо от режимов передачи кадров, любой временной интервал Δt работы кредитного формирователя может быть разделен на три части (см. рисунок 11):

$$\Delta t = \Delta t^+ + \Delta t^- + \Delta t^0, \tag{14}$$

где Δt^+ – время нарастания кредита трафика СП; Δt^- – время снижения кредита трафика СП; Δt^0 – время неизменного значения кредита трафика СП.

Обслуживание трафика СП сегмента Fronthaul в выходном порту TSN Ethernet возможно только в течение времени снижения кредита Δt^- . Учитывая это, определим кривые обслуживания трафика СП для соответствующего режима интеграции с потоками других приоритетов.

Рассмотрим вначале режим работы коммутатора TSN Ethernet без прерывания кадров. Обозначим процессы поступления и передачи потоков СП в выходной порт через $A_{СП}$ и $A_{СП}^*$ соответственно. Аналогично для потоков ВП и условного трафика ЗИ введем соответствующие обозначения $A_{ВП}$, $A_{ВП}^*$, $A_{ЗИ}$ и $A_{ЗИ}^*$. Пусть τ – начало последнего периода занятости выходного порта TSN Ethernet. Следовательно, в момент времени τ очереди кадров всех потоков пусты, т. е. $A_{СП}^* = A_{СП}$, $A_{ВП}^* = A_{ВП}$, $A_{ЗИ}^* = A_{ЗИ}$ и кредит потока СП $C_{СП} = 0$.

Для некоторого произвольного времени $t \geq \tau$ интервал $\Delta t = t - \tau$ можно разделить на три составляющие согласно (14). В режиме без прерывания интервал Δt^0 обусловлен ЗИ и окнами передачи трафика ВП, т. е. $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0$ и $\Delta t^- = \Delta t_{СП}^-$ т. е. он соответствует времени передачи кадра СП.

Тогда изменение кредита в течение временного интервала Δt удовлетворяет выражению:

$$C_{СП}(t) - C_{СП}(\tau) = C_{СП}(\Delta t) = \Delta t^+ \cdot V_{СП}^{up} + \Delta t^- \cdot V_{СП}^{down} = \left(\Delta t - (\Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0) \right) \cdot V_{СП}^{up} - \Delta t_{СП}^- (V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}). \tag{15}$$

Таким образом, в режиме без прерывания получаем соотношение времени обслуживания для трафика СП, ВП и ЗИ в любом интервале Δt :

$$\Delta t_{СП}^- = \frac{\left(\Delta t - (\Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0) \right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}(t)}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}. \tag{16}$$

Однако в наихудшем случае объем данных кадров трафика ВП в выходном порту TSN Ethernet на интервале Δt можно определить как:

$$A_{ВП}^*(t) - A_{ВП}^*(\tau) = A_{ВП}^*(t) - A_{ВП}(\tau) = R \cdot \Delta t_{ВП}^0. \tag{17}$$

Аналогичное выражение справедливо для объема условных данных неиспользуемой полосы пропускания выходного порта из-за ЗИ:

$$A_{ЗИ}^*(t) - A_{ЗИ}^*(\tau) = A_{ЗИ}^*(t) - A_{ЗИ}(\tau) = R \cdot \Delta t_{ЗИ}^0.$$

Так как $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0$, то справедливо неравенство:

$$\Delta t^0 \leq \frac{\left((A_{ВП}(t) + A_{ЗИ}(t)) - (A_{ВП}(\tau) + A_{ЗИ}(\tau)) \right)}{R} \leq \frac{V_{ВП+ЗИ}(\Delta t)}{R}. \tag{18}$$

Тогда, учитывая (16 и 18), объем данных кадров СП в выходном порту TSN Ethernet на интервале Δt ограничен неравенством:

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) = R \cdot \Delta t_{СП}^- \geq R \cdot \frac{\left(\Delta t - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\Delta t)}{R}\right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \quad (19)$$

Поскольку кумулятивная функция выходного потока $A_{СП}^*(t)$ является возрастающей функцией в широком смысле, справедливы неравенства:

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) \geq 0, \quad (20)$$

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) \geq \sup_{0 \leq \tau \leq \Delta t} \left\{ R \cdot \frac{\left(\tau - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\tau)}{R}\right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \right\}. \quad (21)$$

Отсюда кривая обслуживания трафика СП имеет следующий вид:

$$\beta_{СП}^{HP}(t - \tau) = \left[\sup_{0 \leq \tau \leq \Delta t} \left\{ \frac{R \cdot V_{СП}^{up}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \cdot \left(\tau - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\tau)}{R} - \frac{C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up}} \right) \right\} \right]^+ \quad (22)$$

Зная эту кривую, можно получить объем трафика СП в выходном порту TSN Ethernet в любой момент времени $0 \leq \tau \leq t$:

$$A_{СП}(t) \geq \inf_{0 \leq \tau \leq t} \{ A_{СП}(\tau) + \beta_{СП}^{HP}(t - \tau) \} = (A_{СП} \otimes \beta_{СП}^{HP})(t). \quad (23)$$

Теперь определим кривые обслуживания трафика СП1 и СП2 в режиме с прерыванием кадров более низких приоритетов. В этом режиме интервал $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0$ представляет собой длину временного окна передачи трафика ВП в течение интервала наблюдения $\Delta t = t - \tau$, и интервал Δt^- можно разделить на время передачи кадра СП и время передачи служебной информации, связанной с прерыванием, т. е. $\Delta t^- = \Delta t_{СП}^- + \Delta t_{СЛ}^-$.

Тогда изменение кредита трафика СП в интервале Δt в режиме с прерыванием определяется выражением:

$$C_{СП}(t) - C_{СП}(\tau) = C_{СП}(\Delta t) = \Delta t^+ \cdot V_{СП}^{up} + \Delta t^- \cdot V_{СП}^{down} = (\Delta t - \Delta t_{ВП}^0) \cdot V_{СП}^{up} - (\Delta t_{СЛ}^- + \Delta t_{СП}^-) (V_{СП}^+ - V_{СП}^{down}). \quad (24)$$

Таким образом, в режиме с прерыванием получаем соотношение между длительностью передачи трафика СП, интервалом времени простоя порта из-за ЗИ и длительности окон передачи трафика ВП в любом интервале Δt :

$$\Delta t_{СП}^- = \frac{(\Delta t - \Delta t_{ВП}^0) \cdot V_{СП}^{up} - \Delta t_{СЛ}^- \cdot (V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}) - C_{СП}(t)}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}. \quad (25)$$

Поскольку в худшем случае объем трафика ВП в выходном порту в течение Δt определяется выражением (17), то аналогично можно записать выра-

жение для объема служебных данных, передаваемых в течение Δt из-за наличия прерываний кадров:

$$A_{СЛ}(t) - A_{СЛ}(\tau) = A_{СЛ}^*(t) - A_{СЛ}(\tau) = R \cdot \Delta t_{СЛ}^0. \quad (26)$$

Таким образом, длительность интервала $\Delta t_{ВП}^0$ имеет следующие ограничения:

$$\Delta t_{СЛ}^0 \leq \frac{V_{СЛ}(t)}{R}. \quad (27)$$

Тогда, с учетом (15, 16 и 17) можно определить суммарный объем данных трафика СП в выходном порту на интервале времени Δt :

$$A_{СП}(t) - A_{СП}(\tau) = R \cdot \Delta t_{СП}^- \geq \frac{R \cdot V_{СП}^{up}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} = \left(\Delta t - \frac{V_{ВП}(\Delta t)}{R} - \frac{V_{ЗИ}(\Delta t)}{R} \cdot \frac{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}{V_{СП}^{up}} - \frac{C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up}} \right). \quad (28)$$

Правая часть неравенства (28) и является кривой обслуживания трафика СП в сегменте Fronthaul в режиме с прерыванием кадров.

Границы задержки трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul

Согласно теории Network Calculus, верхняя граница задержки i -го потока трафика СП $W_{СПi}$ в выходном порту TSN Ethernet определяется максимальным горизонтальным отклонением между кривой поступления $\alpha_{СП}(t)$ всех конкурирующих потоков СП и кривой их обслуживания $\beta_{СП}(t)$:

$$W_{СПi} = h(\alpha_{СП}(t), \beta_{СП}(t)), \quad (29)$$

где кривая обслуживания определяется выражениями (22) или (28) в зависимости от режима обслуживания трафика различных приоритетов – с прерыванием или без прерывания.

При использовании модели входящего потока типа (σ, ρ) кривая поступления трафика СП может быть записана в виде:

$$\alpha_{СП}(t) = \sum_{СПi \in I} \sigma_{СПi} + \sum_{СПi \in I} \rho_{СПi} \cdot t, \quad (30)$$

где $\sigma_{СПi}$ – пачечность i -го потока трафика СП; $\rho_{СПi}$ – долговременная устойчивая скорость i -го потока трафика СП.

В выходном порту TSN Ethernet конечной точки-источника трафика $\sigma_{СПi}^0 = L_{СПi}$ и $\rho_{СПi}^0 = L_{СПi}/T_{СПi}$, где $T_{СПi}$ – гиперцикл передачи i -го потока трафика СП i во временном расписании GCL

Кроме того, кривая потока для выходного порта TSN Ethernet конечной точки-источника i -го потока трафика может быть принята как кривая входного потока для n -го выходного порта следующего коммутатора на маршруте передачи трафика СП в сегменте Fronthaul и может быть записана как:

$$\alpha_{СПi}^n(t) = \alpha_{СПi}^0(t + W_{СПi}^0) = \sigma_{СПi}^0 + \rho_{СПi}^0(t + W_{СПi}^0). \quad (31)$$

Используя подход профиля IEEE 802.1CM границы наихудшей сквозной задержки (E2E) на маршруте передачи i -го потока трафика СП, можно получить путем суммирования максимальных задержек $W_{СПi}^{\max}$ в $(N - 1)$ выходных портах узлов сети TSN Ethernet на маршруте передачи трафика от исходящей конечной точки (в случае Fronthaul – это радиоустройство eRE) до конечной точки назначения (в случае Fronthaul – это контроллер eREC):

$$W_{СПi}^{E2E} = \sum_{n \in СПi} W_{СПi}^{\max} + (N - 1) \cdot T_{SW}, \quad (32)$$

где T_{SW} – постоянная технологическая задержка в коммутаторе TSN Ethernet, которая у современных коммутаторов может достигать нескольких микросекунд; N – число сетевых переходов в сегменте Fronthaul на базе TSN Ethernet.

При определении граничной задержки $W_{СПi}^{\max}$ для кадра потока СП i в узле TSN Ethernet будем учитывать максимальную задержку из-за ожидания в очереди кадров потоков СП того же приоритета $W_{СПi}^{FIFO}$, максимальную задержку из-за блокировки передачи кадрами с более высоким приоритетом $W_{ВП}^{\max}$, а также максимальную задержку из-за блокировки кадрами с более низким приоритетом $W_{НП}^{\max}$, которые учитывают задержки в худшем случае из-за недостаточного кредита потока СП i (см. рисунок 11):

$$W_{СПi}^{\max} = W_{СПi}^{FIFO} + W_{НП}^{\max} \cdot \left(1 + \frac{V_{СП}^{\uparrow}}{V_{СП}^{\downarrow}}\right) + W_{ВП}^{\max}. \quad (33)$$

Первое слагаемое в (33) можно определить по формуле:

$$W_{СПi}^{FIFO} = W_{СПi} + \sum_{СПj \in СПi, j \neq i} W_{СПj} \cdot \left(1 + \frac{V_{СПi}^{\downarrow}}{V_{СПi}^{\uparrow}}\right). \quad (34)$$

В уравнении (34) суммирование задержек $W_{СПj}$ выполняется для всех j -х потоков СП того же приоритета, что и рассматриваемый i -й поток, при этом $V_{СПi}^{\uparrow} + V_{СПi}^{\downarrow} = R$. Таким образом, максимальная загрузка канала TSN Ethernet потоком СП i -го приоритета составляет $V_{СПi}^{\uparrow}/R$. Она достигается, когда в очереди на передачу находится только кадры потока i -го приоритета.

Чтобы гарантировать, что кадры СП i будут иметь конечное время передачи в худшем случае в узле TSN Ethernet, необходимым условием является то, чтобы величина трафика СП i от всех K радиоустройств eRE была меньше его минимального коэффициента резервирования полосы пропускания $B_{СПi}$:

$$\sum_{j=1}^K \frac{W_{СПi}^j}{T_{СПi}} \leq B_{СПi}. \quad (35)$$

Численное моделирование

На основе полученных результатов были рассчитаны верхние границы задержек передачи трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul при различных параметрах кредитного формирователя CBS и скорости канала TSN Ethernet. При увеличении скорости канала передачи данных в сегменте Fronthaul от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с задержки существенно уменьшаются (на 30,6 % для СП1 и на 26,6 % для СП2), в то же время при дальнейшем увеличении скорости до 10 Гбит/с уменьшение задержки незначительное (рисунки 12а, 12б). Это обусловлено влиянием загрузки канала на время передачи кадров и длину очередей в сети TSN Ethernet.

Увеличение доли полосы пропускания в сегменте Fronthaul, выделяемой трафику СП1, приводит к перераспределению сетевого ресурса TSN Ethernet в его пользу, что выражается в снижении его задержки при одинаковых значениях скорости R (рисунки 12с, 12д).

Изменение максимального размера кадра TSN Ethernet оказывает влияние на величину задержки обслуживания обоих потоков (рисунок 13). Увеличение размера кадра в диапазоне от 500 до 2000 байт сопровождается практически линейным ростом задержки не более чем на 4,3 % для СП1 и 3,5 % для СП2. Рост обусловлен увеличением времени передачи одного кадра и, соответственно, времени ожидания обслуживания в очереди.

Представленные на рисунке 14 зависимости демонстрируют рост задержки при увеличении длительности цикла передачи трафика СП1 и СП2 в расписании GCL. При небольшом количестве радиоустройств $K \leq 3$ изменение длительности цикла в рассматриваемом диапазоне незначительно влияет на задержку, в то же время при $K = 10$ и $T_c = 1,5$ мс увеличение задержки составляет 5,4 % для СП1 и 10,1 % для СП2. Рост объясняется удлинением периода ожидания обслуживания кадров трафика соответствующего потока из-за увеличения загрузки канала.

Полученные зависимости задержки обслуживания потоков трафика среднего приоритета СП1 и СП2 от варьируемых параметров кредитного формирователя трафика CBS позволяют на практике определить условия обеспечения гарантированного качества обслуживания. Наибольшее влияние на величину задержки оказывает число подключенных радиоустройств. Увеличение нагрузки приводит к значительному росту времени ожидания обслуживания и при достижении определенных значений может вызвать превышение граничных уровней. Существенное влияние на задержку оказывают также параметры распределения полосы пропускания между потоками СП1 и СП2. Изменение данных параметров сопровождается перераспределением

ресурса между потоками и может приводить к значительному увеличению задержки трафика сред-

него приоритета при большом числе подключенных к сегменту Fronthaul радиоустройств.

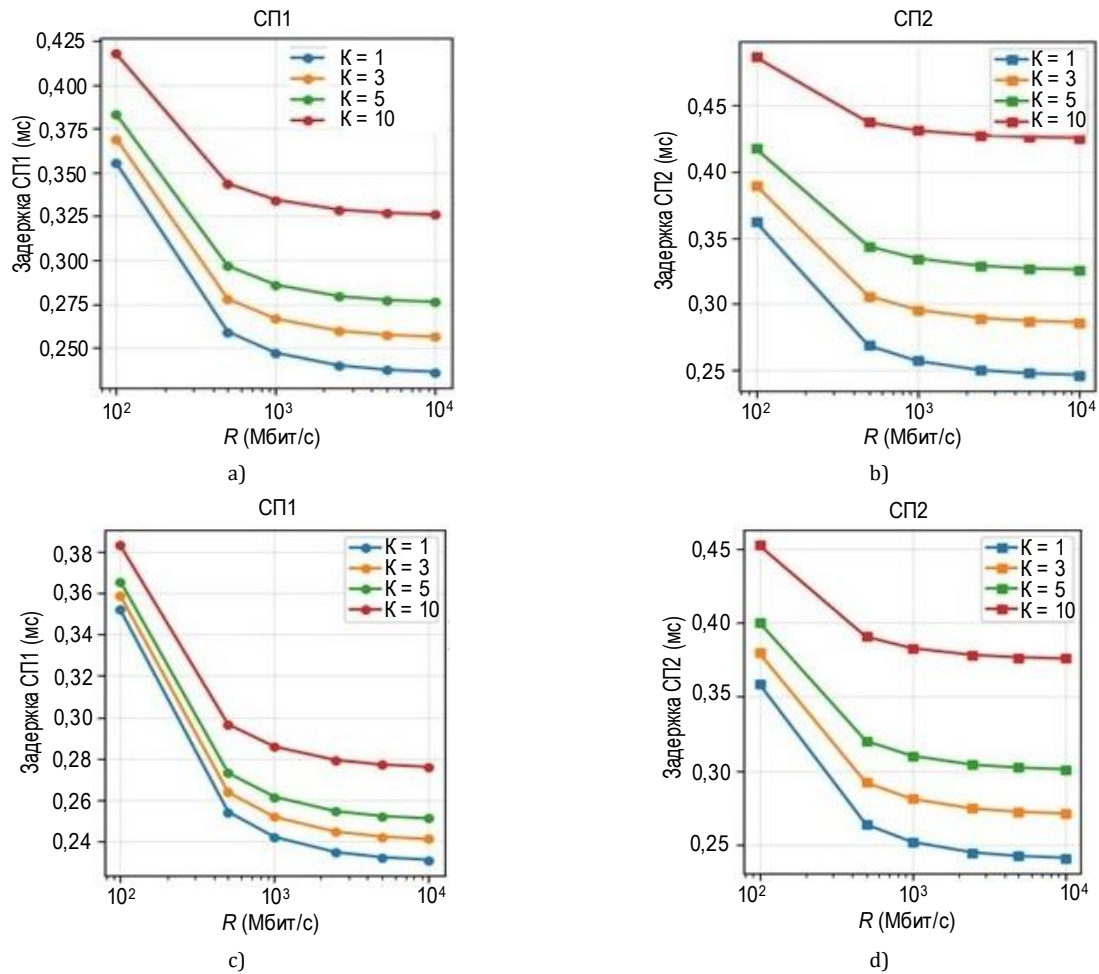


Рис. 12. Зависимость задержки трафика от скорости канала: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$; в) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; г) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Fig. 12. Dependence of Delay on the Channel Speed: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$; в) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; г) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

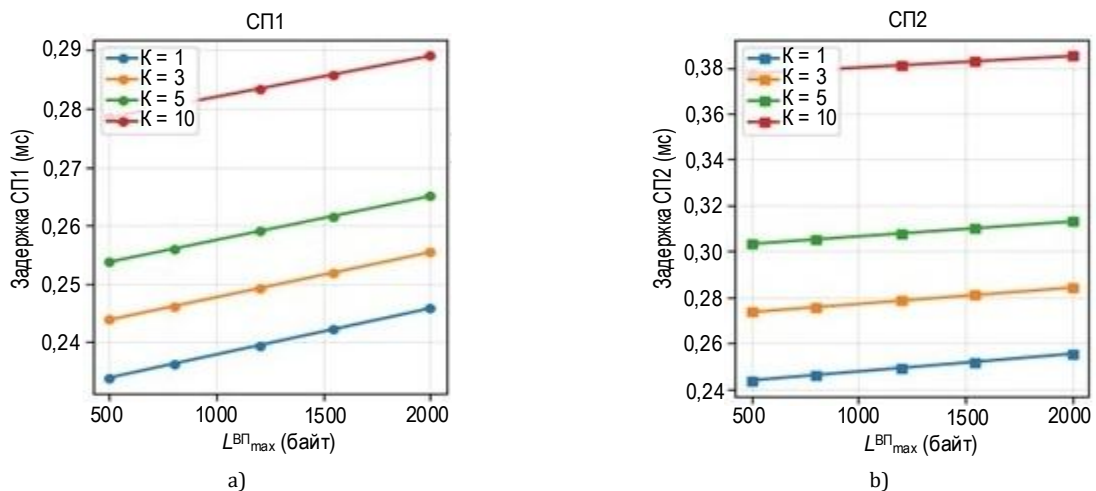
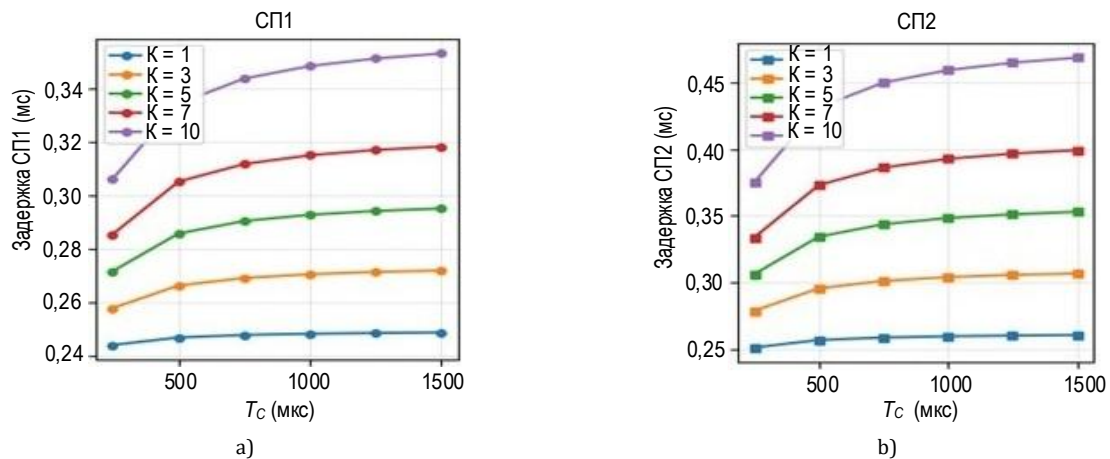


Рис. 13. Зависимость задержки от длины кадра TSN Ethernet: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Fig. 13. Ethernet TSN Frame Length Dependence on Latency: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Рис. 15. Зависимость задержки от длительности цикла: а) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$ Fig. 15. Dependence of Delay on Cycle Duration: a) $\Delta B_{SP1} = 0,1$; b) $\Delta B_{SP2} = 0,05$

Следует учитывать, что все указанные выше величины задержек потоков трафика СП1 и СП2 в сегменте Fronthaul не включали задержку сигнала в среде передачи. Эта величина пропорциональна физической длине линии / канала связи. В сетях 4G / 5G сегмент Fronthaul обычно имеет длину не более 10 км, поэтому при удельной задержке в 5 мкс на 1 км оптоволокна дополнительная задержка в среде передачи не будет превышать 50 мкс, что не существенно влияет на суммарную задержку.

Заключение

Показано, что в сетях мобильной связи 5G в сегменте Fronthaul, кроме трафика радиointерфейса eCPRI, передается трафик различных сторонних приложений (критически важные приложения Индустрии 4.0, промышленный Интернет вещей, беспилотный транспорт, интеллектуальные транспортные сети и др.), использующих мобильные сети как транспорт с гарантированной и надежной доставкой данных. Этот трафик чаще всего является аperiodическим и передача его в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet в строго отведенные временные интервалы с использованием временного формирователя TAS может привести к неэффективному использованию полосы пропускания.

При передаче трафика eCPRI среднего приоритета (медленные пользовательские данные и быстрые данные S&M) и трафика сторонних приложений, допускающего определенный джиттер, для

эффективной загрузки сегмента Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet предложено использовать формирователь на основе кредита CBS, соответствующий стандарту IEEE 802.1av, который позволяет разделить весь трафик среднего приоритета на два типа и сделать более гибкое распределение полосы пропускания между ними.

Разработана математическая модель передачи разнородного трафика в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя CBS с помощью теории Network Calculus, включающая аналитические выражения для кривых поступления трафика среднего приоритета двух типов и кривых его обслуживания в узле TSN Ethernet.

С использованием предложенной модели разработан метод оценки максимальных сквозных задержек трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet, учитывающий требования профиля IEEE 802.1CM. Результаты проведенного аналитического моделирования показали, что допустимая конфигурация кредитного формирователя CBS должна определяться с учетом совокупности ряда параметров. Задержки трафика среднего приоритета в значительной мере обусловлены совокупным влиянием числа подключенных к сегменту Fronthaul радиоприборов, распределением полосы пропускания между потоками СП1 и СП2 и скоростью канала TSN Ethernet, тогда как длительность цикла реализации временного расписания и максимальный размер кадра незначительно влияют на задержки.

Список источников

1. Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 года №3339-р. 93 с.
2. Коган С. Стандартизация решений и сегментирование транспортного уровня сети 5G // Первая миля. 2021. № 2(94). С. 40–47. DOI:10.22184/2070-8963.2021.94.2.40.47. EDN:KUCZTI
3. Богданова Е., Шишков К. Сегменты транспортной сети 5G // Connect. 2020. № 5–6. С. 84–87. URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> (дата обращения 01.06.2026)

4. Коган С. Транспортная оптическая инфраструктура для 5G // Connect. 2020. № 5–6. С. 74–80. URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> (дата обращения 01.06.2026)
5. Тихвинский В. Архитектура построения и характеристики сетей радиодоступа NG-RAN 5G // Первая миля. 2018. № 5(74). С. 42–51. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.42.51. EDN:VADUZA
6. Богданова Е. Транспортная сеть 5G/IMT-2020 // Первая миля. 2019. № 7(84). С. 40–47. DOI:10.22184/2070-8963.2019.84.7.40.47. EDN:DMPJBQ
7. IEEE Std 802.1Q™-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. New York: IEEE, 2018. 1993 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8403927
8. Росляков А.В., Герасимов В.В., Сударева М.Е., Мамошина Ю.С. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 187–201. DOI:10.18469/ikt.2021.19.2.07. EDN:WSHBML
9. Лихтциндер Б.Я. Синхронизированные по времени сети Ethernet. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 199 с. EDN:QDEKMV
10. Лихтциндер Б.Я. Особенности TSN // Вестник связи. 2021. № 7. С. 32–37. EDN:LHOQTW
11. Лихтциндер Б.Я. Сети Ethernet с детерминированными задержками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 3(75). С. 81–97. DOI:10.14498/tech.2022.3.6. EDN:EUMFSA
12. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53. DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
13. Берёзкин А.А., Паршин А.А., Парфенов Д.Д., Киричек Р.В. Анализ стандартов сетей, синхронизируемых по времени, для управления роботизированными системами в режиме реального времени // Электросвязь. 2023. № 6. С. 20–31. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
14. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 1. С. 18–22. URL: <https://read.cta.ru/cta2020-1/18/index.html> (дата обращения 01.06.2026)
15. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 2. С. 22–27. URL: <https://read.cta.ru/cta2020-2/22/index.html> (дата обращения 01.06.2026)
16. IEEE Std 802.1CM™-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Time-Sensitive Networking for Fronthaul. New York: IEEE, 2018. 62 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8376066
17. Росляков А.В., Герасимов В.В. Применение теории сетевого исчисления для анализа задержек трафика радиointерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2025. Т. 167. № 2. С. 351–366. DOI:10.26907/2541-7746.2025.2.351-366. EDN:KJBNYL
18. Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологий TSN // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 73–84. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTL0
19. Росляков А.В. Анализ механизмов качества обслуживания трафика в сетях, чувствительных ко времени // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17. № 1. С. 27–35. DOI:10.36724/2409541920251712735. EDN:XKQTQX
20. IEEE Std 802.1Qav™-2009. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Virtual Bridged Local Area Networks. Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams. New York: IEEE, 2009. 72 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2010.8684664
21. IEEE Std 802.1Qbv™-2015. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – MAC Bridges and Virtual Bridged LANs. Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic. IEEE, 2015. 57 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.8613095
22. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
23. Караулова О.А., Киреева Н.В., Чупахина Л.Р. Анализ времени ожидания в G/G/1 очереди // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 4. С. 393–399. DOI:10.18469/ikt.2018.16.4.05. EDN:EEIPRG
24. Cruz R.L. A Calculus for network delay. Part I. Network elements in isolation // IEEE Transactions on Information Theory. 1991. Vol. 37. Iss. 1. PP. 114–131. DOI:10.1109/18.61109
25. Cruz R.L. A Calculus for Network Delay. Part II. Network Analysis // IEEE Transactions on Information Theory. 1991. Vol. 37. Iss. 1. PP. 132–141. DOI:10.1109/18.61110
26. Le Boudec J.-Y., Thiran P. Network Calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2050. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. 263 p. DOI:10.1007/3-540-45318-0
27. Кудрявцева Е.Н., Росляков А.В. Базовые принципы и перспективы использования теории сетевого исчисления (Network Calculus) // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11. № 3. С. 34–39. EDN:RWUXTD
28. Росляков А.В., Лысиков А.А., Витевский В.Д. Сетевое исчисление (Network Calculus). Часть 1. Теоретические основы // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 19–33. DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02. EDN:XTHBID
29. Росляков А.В., Лысиков А.А. Сетевое исчисление (Network Calculus) и его применение для оценки сетевых характеристик. Самара: ПГУТИ, 2019. 222 с. EDN:ZYXPZA
30. Кривулин Н.К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2009. 256 с.
31. IEEE Std 802.1Qbu™-2016. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Frame Preemption. IEEE, 2016. 52 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7553415
32. IEEE Std 802.3br™-2016. IEEE Standard for Ethernet – Interspersing Express Traffic. IEEE, 2016. 58 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7900321
33. Li J., Li Q., Xiong H. Joint optimization of reconfiguration and traffic planning in time-triggered networks // Electronics Letters. 2024. Vol. 60. Iss. 1. P. e13071. DOI:10.1049/el2.13071. EDN:XLHMAD

34. Pop P., Alexandris K., Wang T. Configuration of multi-shaper Time Sensitive Networking for industrial applications // IET Networks. 2024. Vol. 13. Iss. 5-6. PP. 434–454. DOI:10.1049/ntw2.12129. EDN:KNRFCU
35. Zhao L., Pop P., Zheng Z., Li Q. Timing Analysis of AVB Traffic in TSN Networks Using Network Calculus // IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (Porto, Portugal, 11–13 April 2018). IEEE; 2018. PP. 25–36. DOI:10.1109/RTAS.2018.00009

References

1. *Strategy for the Development of the Communications Sector of the Russian Federation for the Period up to 2035*. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated November 24, 2023 No. 3339-р. 93 p. (in Russ.)
2. Kogan S. Standardization of solutions and segmentation of the transport level of the 5G network. *Last Mile*. 2021;2(94): 40–47. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2021.94.2.40.47. EDN:KUCZTI
3. Bogdanova E., Shishkov K. Transport network segments of 5G. *Connect*. 2020;5–6:84–87. (in Russ.) URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> [Accessed 01.06.2026]
4. Kogan S. Transport optical infrastructure for 5G. *Connect*. 2020;5–6:74–80. (in Russ.) URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> [Accessed 01.06.2026]
5. Tikhvinsky V. Architecture and characteristics of NG-RAN 5G. *Last Mile*. 2018;5(74):42–51. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.42.51. EDN:VADUZA
6. Bogdanova E. 5G/IMT-2020 transport network. *Last Mile*. 2019;7(84):40–47. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2019.84.7.40.47. EDN:DMPJBQ
7. IEEE Std 802.1Q™-2018. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks*. New York: IEEE; 2018. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8403927
8. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Sudareva M.E., Mamoshina Yu.S. TSN Ethernet – Time-Sensitive Networking. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2021;19(2):187–201. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2021.19.2.07. EDN:WSHBML
9. Likhhtsinder B.Ya. *Time-Synchronized Ethernet Networks*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2024. 199 p. (in Russ.) EDN:QDEKMW
10. Likhhtsinder B.Ya. Features TSN. *Vestnik Svyazi*. 2021;(7):32–41. (in Russ.) EDN:LHOQTW
11. Likhhtsinder B.Ya. Ethernet networks with deterministic delays. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2022;30(3):81–97. (in Russ.) DOI:10.14498/tech.2022.3.6. EDN:EUMFSA
12. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E. Time sensitive networking standardization. *Standarts and Quality*. 2021;4:48–53. (in Russ.) DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
13. Berezkin A.A., Parshin A.A., Parfenov D.D., Kirichek R.V. Analysis of time-synchronized network standards for real-time control of robotic systems. *Elektrosvyaz*. 2023;(6):20–31. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
14. Vorobyov S. TSN – Time-Synchronized Networks. Parts 1. *Sovremennyye tehnologii avtomatizatsii*. 2020;1:18–22. (in Russ.). URL: <https://read.cta.ru/cta2020-1/18/index.html> [Accessed 01.06.2026]
15. Vorobyov S. TSN – Time-Synchronized Networks. Parts 2. *Sovremennyye tehnologii avtomatizatsii*. 2020;2:22–27. (in Russ.). URL: <https://read.cta.ru/cta2020-2/22/index.html> [Accessed 01.06.2026]
16. IEEE Std 802.1CM™-2018. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Time-Sensitive Networking for Fronthaul*. New York: IEEE; 2018. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8376066
17. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Application of network calculus to analyze ecpri traffic delays in 4G/5G Fronthaul mobile networks. *Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series* 2025;167(2):351–366. (in Russ.) DOI:10.26907/2541-7746.2025.2.351-366. EDN:KJBNYL
18. Roslyakov A., Gerasimov V. Analysis of End-to-End Delay in the Transport Segment of Fronthaul 4G/5G Networks Based on TSN Technology. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(1):73–84. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
19. Roslyakov A.V. Analysis of traffic quality of service mechanisms in time-sensitive networks. *H&ES Research*. 2025;17(1):27–35. (in Russ.) DOI:10.36724/2409541920251712735. EDN:XXQTQX
20. IEEE Std 802.1Qav™-2009. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Virtual Bridged Local Area Networks. Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams*. New York: IEEE; 2010. DOI:10.1109/IEEESTD.2010.8684664
21. IEEE Std 802.1Qbv™-2015. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.8613095
22. Kleinrock L. *Queueing Systems*. Wiley-Interscience; 1975. 448 p.
23. Karaulova O.A., Kireeva N.V., Chupakhina L.R. Waiting time analysis for G/G/1 Queue. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2018;16(4):393–399. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.4.05. EDN:EEIPRG
24. Cruz R.L. A calculus for network delay. Part I. Network elements in isolation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1991;37(1):114–131. DOI:10.1109/18.61109
25. Cruz R.L. A calculus for network delay. Part II. Network analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1991;37(1): 132–141. DOI:10.1109/18.61110
26. Le Boudec J.-Y., Thiran P. *Network Calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Lecture Notes in Computer Science, vol.2050*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2001. 263 p. DOI:10.1007/3-540-45318-0
27. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. Basic principles and prospects for using network calculus. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2013;11(3):34–39. (in Russ.) EDN:RWUXTD
28. Roslyakov A.V., Lysikov A.A., Vitevskiy V.D. Network calculus. Part 1. Theoretical foundations. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2018;16(1):19–33. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02. EDN:XTHBID

29. Roslyakov A.V., Lysikov A.A. *Network Calculus and Its Application for Evaluating Network Characteristics*. Samara: PSUTI Publ.; 2019. 222 p. (in Russ.) EDN:ZYXPZA
30. Krivulin N.K. *Methods of Idempotent Algebra in Problems of Modeling and Analysis of Complex Systems*. Saint Petersburg: St Petersburg University, Saint Petersburg State University Publ.; 2009. 256 p. (in Russ.)
31. IEEE Std 802.1Qbu™-2016. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. Amendment 26: Frame Preemption*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7553415
32. IEEE Std 802.3br™-2016. *IEEE Standard for Ethernet. Amendment 5: Specification and Management Parameters for Interspersing Express Traffic*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7900321
33. Li J., Li Q., Xiong H. Joint optimization of reconfiguration and traffic planning in time-triggered networks. *Electronics Letters*. 2024;60(1):e13071. DOI:10.1049/ell2.13071. EDN:XLHMAD
34. Pop P., Alexandris K., Wang T. Configuration of multi-shaper Time-Sensitive Networking for industrial applications. *IET Networks*. 2024;13(5-6):434–454. DOI:10.1049/ntw2.12129. EDN:KNRFCU
35. Zhao L., Pop P., Zheng Z., Li Q. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. *Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS, 11–13 April 2018, Porto, Portugal*. IEEE; 2018. p.25–36. DOI:10.1109/RTAS.2018.00009


Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 19.05.2026

The article was submitted 24.03.2026; approved after reviewing 20.04.2026; accepted for publication 19.05.2026

Информация об авторах:


РОСЛЯКОВ
Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0000-0003-3130-8262>

ГЕРАСИМОВ
Вячеслав Васильевич

старший преподаватель кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0004-7791-7981>

Росляков А.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.

Roslyakov A.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 621.398

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71>

EDN:DSL BKD



Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига

Павел Сергеевич Сердюков✉, serdyukov-pavel@mail.ru

Константин Евгеньевич Румянцев, rke2004@mail.ru

Южный федеральный университет,
Таганрог, 347928, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Бесконтактный контроль разновысотности головок тепловыделяющих сборок является важной задачей обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации атомных электростанций, поскольку отклонения пространственного положения тепловыделяющих сборок могут свидетельствовать о деформации элементов активной зоны и приводить к ухудшению условий дальнейшей работы реакторной установки. Применение метода параллакс-сдвига на основе последовательных кадров одной телевизионной камеры позволяет отказаться от механического контакта с объектом контроля и использовать естественное перемещение камеры для формирования квазистереопар. Однако практическое внедрение такого подхода требует количественной оценки влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на итоговую точность определения разновысотности.

Цель настоящего исследования состоит в установлении количественных зависимостей между параметрами телевизионной камеры, геометрией формирования квазистереопар и погрешностью определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига, а также в определении рациональных диапазонов параметров измерительной системы.

Результаты. Установлено, что определяющим фактором итоговой погрешности является ошибка определения диспарантности. Показано, что устойчивость метода обеспечивается не отдельным параметром телевизионной системы, а согласованным выбором фокусного расстояния, базиса квазистереопары, высоты подвеса камеры и условий субпиксельной локализации центров головок тепловыделяющих сборок. Определены рациональные диапазоны параметров измерительной системы. **Новизна** заключается в комплексной оценке влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность метода параллакс-сдвига применительно к задаче бесконтактного контроля головок тепловыделяющих сборок.

Теоретическая и практическая значимость: развитие расчетной модели метода параллакс-сдвига и установление аналитических зависимостей, связывающих ошибку определения диспарантности с погрешностью восстановления относительной высоты объектов регулярной структуры, а также возможность использования полученных диапазонов параметров при настройке телевизионных средств контроля тепловыделяющих сборок и при обосновании требований к бесконтактной измерительной системе, предназначенной для работы в условиях ограниченного пространства активной зоны реактора без применения дополнительных контактных устройств.

Ключевые слова: параллакс-сдвиг, квазистереопара, разновысотность, тепловыделяющие сборки, фокусное расстояние, диспарантность, точность измерений, геометрия съемки, бесконтактные измерения, телевизионная камера, активная зона реактора

Ссылка для цитирования: Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 62–71. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71. EDN:DSL BKD


Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71>

EDN:DSL BKD

Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on the Accuracy of Fuel Assembly Head Height Difference Measurement Using the Parallax-Shift Method

 Pavel S. Serdyukov , serdyukov-pavel@mail.ru

 Konstantin E. Rumyantsev, rke2004@mail.ru

Southern Federal University,
Taganrog, 347928, Russian Federation

Annotation

Relevance. Non-contact monitoring of fuel assembly (FA) head height differences is important for ensuring the safe operation of nuclear power plants. Deviations in FA positions may indicate deformation of reactor core elements and affect reactor performance. The parallax-shift method, based on sequential frames acquired by a single television camera, eliminates mechanical contact with the monitored object and uses camera motion to form quasi-stereo pairs. However, its practical application requires assessing the influence of television system parameters and imaging geometry on measurement accuracy.

The purpose of this study is to establish relationships between television camera parameters, quasi-stereo pair geometry, and the error in determining FA head height differences using the parallax-shift method, as well as to identify rational parameter ranges for the measuring system.

Results. It was established that disparity estimation error is the dominant factor affecting final accuracy. Method stability is achieved through the coordinated selection of focal length, baseline, camera suspension height, and conditions for subpixel localization of fuel assembly head centers. Rational parameter ranges ensuring the required accuracy were determined. **The novelty** lies in the comprehensive assessment of the influence of television system parameters and imaging geometry on the accuracy of the parallax-shift method and in substantiating a rational quasi-stereo measurement configuration formed by a single television camera during arc motion.

Theoretical significance. The theoretical significance is determined by the development of a computational model of the parallax-shift method and by establishing relationships between disparity estimation error and relative height reconstruction error.

Practical significance. The obtained results can be used to configure television systems for FA monitoring and to justify requirements for non-contact measuring systems operating in the confined space of a reactor core.

Keywords: parallax shift, quasi-stereo pair, fuel assembly height difference, focal length, disparity, measurement accuracy, imaging geometry, non-contact measurement, television camera, reactor core

For citation: Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on the Accuracy of Fuel Assembly Head Height Difference Measurement Using the Parallax-Shift Method. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):62–71. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71. EDN:DSL BKD

1. Введение

Бесконтактный контроль геометрических параметров объектов в условиях ограниченного доступа является одним из приоритетных направлений развития современных телевизионных измерительных систем. Для атомных электростанций особую значимость имеет задача определения раз-

новысотности головок тепловыделяющих сборок (далее ТВС), поскольку отклонения их пространственного положения могут свидетельствовать о деформации элементов активной зоны, приводить к нарушению условий эксплуатации и повышать риски при дальнейшей работе реакторной установки. В связи с этим повышение точности и опера-

тивности контроля разнвысотности ТВС представляет собой важную научно-техническую задачу, непосредственно связанную с обеспечением безопасности и эффективности эксплуатации энергоблоков.

Традиционно контроль разнвысотности ТВС на действующих атомных электростанциях (далее АЭС) выполняется с применением контактных средств измерения или специализированных оптомеханических устройств. Однако такие подходы характеризуются существенными ограничениями: необходимостью механического взаимодействия с объектом, увеличением продолжительности перегрузочных операций, усложнением аппаратурной реализации и зависимостью результата от точности позиционирования измерительных средств. Эти обстоятельства стимулируют переход к бесконтактным методам, основанным на анализе телевизионных изображений и использовании алгоритмов технического зрения. Особый интерес в этом контексте представляет применение штатной телевизионной камеры перегрузочной машины, позволяющее реализовать измерение без внесения изменений в существующую инфраструктуру системы контроля.

Одним из перспективных подходов к решению данной задачи является метод параллакс-сдвига, при котором оценка положения объекта осуществляется по смещению его проекции на изображениях, полученных из разных положений одной телевизионной камеры. При дуговом перемещении камеры над активной зоной последовательные кадры видеопотока формируют квазистереопары, а возникающая диспарантность позволяет вычислять относительное положение и разнвысотность головок ТВС. Преимуществом данного подхода является возможность формирования стереобазы не за счет многокамерной схемы, а в результате естественного перемещения камеры, что особенно важно в условиях ограниченного пространства и жестких эксплуатационных требований АЭС. При этом метод может быть интегрирован в существующие системы видеоконтроля без аппаратной модернизации и обеспечивает автоматизированную обработку изображений в реальном времени.

Даже при использовании субпиксельных методов локализации ошибка определения диспарантности остается критическим источником итоговой погрешности, а отклонения геометрии перемещения камеры могут существенно исказить параметры квазистереопар и приводить к снижению метрологической надежности измерений.

Несмотря на наличие работ [1, 2], посвященных как общим вопросам бесконтактного контроля ТВС, так и анализу отдельных составляющих погрешности метода параллакс-сдвига, вопрос комплексного влияния параметров телевизионной

системы и геометрии съемки на точность определения разнвысотности головок ТВС требует отдельного рассмотрения. Для практического применения метода недостаточно показать лишь его принципиальную работоспособность; необходимо установить количественные зависимости между параметрами системы и итоговой точностью измерений, определить чувствительность результата к ошибке диспарантности и обосновать такие значения параметров камеры и траектории перемещения, при которых обеспечивается достоверный контроль допустимых отклонений высоты головок ТВС.

Целью данной статьи является установление количественного влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разнвысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига. Для достижения поставленной цели в работе предлагается расчетная модель формирования квазистереопар, анализируется связь между погрешностью определения разнвысотности и ошибкой диспарантности, выполняется оценка чувствительности результата к изменению фокусного расстояния, размера пикселя, базиса и геометрических параметров перемещения камеры, а также определяются допустимые диапазоны параметров измерительной системы, обеспечивающие контроль разнвысотности ТВС на уровне порядка 5 мм.

2. Расчетная модель определения разнвысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига

В предлагаемом подходе разнвысотность головок ТВС определяется по последовательности изображений, получаемых от одной телевизионной камеры на ПЗС-матрице, установленной на перегрузочной машине и перемещающейся по дуговой траектории над активной зоной реактора. Такое перемещение формирует квазистереопары кадров, в которых одно и то же наблюдаемое основание сцены фиксируется из двух близких положений, а смещение проекции объекта на изображении интерпретируется как диспарантность.

Геометрически задача сводится к определению глубины Z_i для каждой головки ТВС по известному базису B между двумя положениями камеры, фокусному расстоянию f и измеренной диспарантности d_i . В алгоритмической реализации координаты центров головок ТВС сначала определяются на двух кадрах в пиксельной системе координат, после чего вычисляется их взаимное смещение. Поскольку в практической схеме используется одна камера, перемещенная между двумя положениями, базис квазистереопары задается геометрией перемещения камеры, а сама схема эквивалентна классической стереосистеме с малой горизонтальной базой.

Для однозначности дальнейших выводов введем следующие обозначения, приведенные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные обозначения расчетной модели

TABLE 1. Main Notation of the Calculation Model

Обозначение	Физический смысл	Единица измерения
f_{px}	фокусное расстояние в пикселях	px
B	базис квазистереопары	мм
d_i	диспарантность i -й головки ТВС	px
Z_i	глубина i -й головки ТВС относительно камеры	мм
Z_{min}	минимальная глубина в группе объектов	мм
Δh_i	разновысотность i -й головки ТВС	мм

В рабочей конфигурации использовались: разрешение 768×576 пикселей, фокусное расстояние порядка 800 пикселей, высота подвеса камеры около 1300 мм, радиус траектории около 2000 мм и шаг смещения между кадрами порядка 10–15 мм [3]. Наглядная схема метода параллакс-сдвига представлена на рисунке 1.

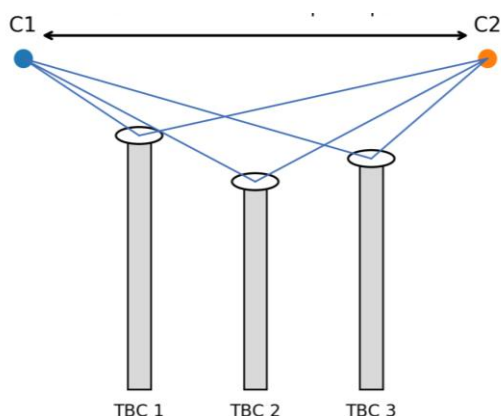


Рис. 1. Расчетная схема метода параллакс-сдвига

Fig. 1. Calculation Scheme of the Parallax-Shift Method

В качестве базового соотношения используется классическая стереозависимость, адаптированная под квазистереопару, формируемую последовательными кадрами одной камеры. В пиксельной форме расчетное выражение удобно записывать следующим образом:

$$Z_i = (f_{px} \cdot B) / d_i.$$

Поскольку в задаче контроля ТВС практически значимой величиной является не абсолютная глубина как таковая, а разность высот между головками, далее вводится относительная характеристика:

$$\Delta h_i = Z_i - Z_{min}.$$

Такая нормализация позволяет исключить постоянную составляющую, связанную с абсолютным положением камеры, и перейти непосредственно к измерению разновысотности.

Если требуется перейти к записи через физические параметры матрицы, можно использовать связь:

$$f_{px} = f / s,$$

где f – фокусное расстояние объектива в миллиметрах; s – размер пикселя матрицы.

Тогда выражение для глубины принимает вид:

$$Z_i = (f \cdot B) / (s \cdot d_i).$$

Для демонстрации работоспособности расчетной модели рассмотрим пример, в котором использовались параметры $f_{px} = 1545$ px и $B = 12$ мм. Из измеренных координат центров на двух кадрах были получены диспарантности $d_1 = 4,8$ px, $d_2 = 7,2$ px и $d_3 = 7,2$ px.

Тогда глубины объектов составляют:

$$Z_1 = (1545 \cdot 12) / 4,8 = 3862,5 \text{ мм},$$

$$Z_2 = (1545 \cdot 12) / 7,2 = 2575,0 \text{ мм},$$

$$Z_3 = (1545 \cdot 12) / 7,2 = 2575,0 \text{ мм}.$$

Примечание. В примере значение $f_{px} = 1545$ px соответствует объективу $f \approx 12,8$ мм при $s = 8,3$ мкм. Значения Δh порядка сотен миллиметров носят иллюстративный характер и демонстрируют формулу при произвольных диспаранностях. В реальной задаче контроля ТВС разновысотности не превышают 5 мм, диспарантности соседних головок различаются на доли пикселя – поэтому необходима субпиксельная локализация центров. Практически достигаемая точность $\pm 1,3$ мм (при $B = 12$ мм) подтверждена экспериментально [4].

Минимальная глубина в рассматриваемой группе равна $Z_{min} = 2575,0$ мм, поэтому относительные высоты определяются как:

$$\Delta h_1 = 3862,5 - 2575,0 = 1287,5 \text{ мм},$$

$$\Delta h_2 = 2575,0 - 2575,0 = 0 \text{ мм},$$

$$\Delta h_3 = 2575,0 - 2575,0 = 0 \text{ мм}.$$

Основные расчеты разновысотности по данным квазистереопары представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Пример расчета разновысотности по данным квазистереопары

TABLE 2. Example of Height Difference Calculation from Quasi-Stereo Pair Data

№ объекта	d_i , px	Z_i , мм	Δh_i , мм
1	4,8	3862,5	1287,5
2	7,2	2575,0	0
3	7,2	2575,0	0

Таким образом, базовая расчетная модель метода параллакс-сдвига сводит задачу определения разновысотности головок ТВС к трем основным

этапам: выделению центров головок ТВС на квазистереопаре изображений, вычислению диспарантности для каждой головки и пересчету глубины в относительную высоту. Уже из полученных соотношений видно, что итоговая точность метода в наибольшей степени определяется точностью определения диспарантности.

Для иллюстрации работы модели в условиях, соответствующих реальной задаче контроля головок ТВС, рассмотрим практический пример с параметрами рабочей конфигурации: $f_{px} = 800$ px, $B = 12$ мм, высота подвеса телевизионной камеры ≈ 1200 мм. При этих параметрах разновысотность головок порядка 5 мм соответствует различию диспарантностей соседних объектов на уровне 0,03–0,04 px, что непосредственно подтверждает необходимость субпиксельной точности определения центров окружностей.

Пусть три наблюдаемые головки ТВС имеют следующие диспарантности (px), определенные по паре квазистереокадров: $d_1 = 8,000$; $d_2 = 7,980$; $d_3 = 7,967$.

Тогда глубины объектов относительно телевизионной камеры составляют:

$$Z_1 = (800 \cdot 12) / 8,000 = 1200,0 \text{ мм},$$

$$Z_2 = (800 \cdot 12) / 7,980 = 1203,0 \text{ мм},$$

$$Z_3 = (800 \cdot 12) / 7,967 = 1205,0 \text{ мм}.$$

Минимальная глубина в рассматриваемой группе $Z_{\min} = 1200,0$ мм.

Разновысотности головок ТВС относительно опорной:

$$\Delta h_1 = 0,0 \text{ мм}; \Delta h_2 = 3,0 \text{ мм}; \Delta h_3 = 5,0 \text{ мм}.$$

Практический пример расчет разновысотности представлен в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Практический пример расчета разновысотности при реальных параметрах ($f_{px} = 800$ px, $B = 12$ мм)

TABLE 3. Practical Height Difference Calculation Example at Real Parameters ($f_{px} = 800$ px, $B = 12$ mm)

№ объекта	d_i , px	Z_i , мм	Δh_i , мм
1	8,000	1200,0	0,0
2	7,980	1203,0	3,0
3	7,967	1205,0	5,0

Данный пример наглядно демонстрирует, что при реальных параметрах рабочей конфигурации диспарантности соседних объектов различаются на 0,020–0,033 px, то есть существенно менее одного пикселя. Следовательно, достоверное измерение разновысотностей порядка 5 мм возможно лишь при субпиксельной точности определения центров головок ТВС, что в полной мере согласуется с требованиями к алгоритмической реализации метода параллакс-сдвига.

3. Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности

Точность определения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига определяется не только качеством алгоритмов выделения окружностей, но и выбором параметров телевизионной системы и геометрии формирования квазистереопары. К числу ключевых факторов относятся фокусное расстояние, размер пикселя, базис квазистереопары, величина диспарантности, радиус дуги, высота подвеса и угловое положение камеры.

Из базовой формулы $Z = (f \cdot B) / (s \cdot d)$ следует, что глубина Z возрастает пропорционально фокусному расстоянию и базису, убывает пропорционально размеру пикселя и диспарантности, а относительная погрешность в первом приближении может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta d}{d}.$$

Следовательно, фокусное расстояние, базис и размер пикселя влияют на результат линейно в относительном смысле, тогда как роль диспарантности оказывается двойственной: с одной стороны, рост d уменьшает оценку глубины, с другой – повышает устойчивость измерения к ошибкам локализации изображения.

Наиболее показательной является частная производная по диспарантности:

$$\partial Z / \partial d = - (f \cdot B) / (s \cdot d^2).$$

Из этого выражения следует, что чувствительность результата к ошибке Δd обратно пропорциональна квадрату диспарантности. Это означает, что при малом параллаксе даже субпиксельная ошибка определения центра головки ТВС может приводить к заметной ошибке по высоте.

Из параметров телевизионных средств наиболее прямое влияние на точность оказывают фокусное расстояние объектива и размер пикселя матрицы. Увеличение фокусного расстояния приводит к росту масштаба изображения и, следовательно, к росту диспарантности для одного и того же пространственного смещения объекта. Аналогично уменьшение размера пикселя улучшает пространственное разрешение и уменьшает шаг квантования координат центра окружности, однако этот выигрыш реализуется только при достаточном качестве оптики и устойчивой предобработке изображения.

Наряду с параметрами оптики и геометрией формирования квазистереопары, существенное влияние на точность определения центров головок ТВС оказывают условия освещенности и качество изображения. Недостаточная или неравномерная осве-

ценность активной зоны реактора снижает локальный контраст изображения, затрудняет выделение границ объектов и приводит к росту случайной составляющей ошибки субпиксельной локализации центра. Снижение отношения сигнал/шум (ОСШ) в изображении непосредственно увеличивает неопределенность вычисляемых координат центра окружности, то есть увеличивает ошибку диспарантности Δd , которая, как было показано в настоящем разделе, является определяющим фактором итоговой погрешности определения разновысотности.

Для ослабления влияния указанных факторов в алгоритмической схеме обработки видеопотока применяются: нормализация яркости с ограничением контраста (метод CLAHE), медианная и гауссова фильтрация шумов, автоматическое управление экспозицией телевизионной камеры, а также отбраковка кадров с недостаточным контрастом по заданному пороговому критерию. Практика применения субпиксельных методов локализации контуров показывает: для обеспечения ошибки $\Delta d \leq 0,1$ px необходимо поддерживать отношение сигнал / шум изображения не ниже 20 дБ, что достигается при надлежащей организации освещения рабочей зоны и применении адаптивной предобработки кадра. Данное требование должно учитываться при проектировании осветительной подсистемы телевизионного контроля ТВС.

Отдельно необходимо выделить ошибку определения диспарантности Δd . Для ее практической иллюстрации влияния рассмотрим расчетную оценку чувствительности в пиксельной форме:

$$Z = (f_{px} \cdot B) / d, \quad \Delta Z_d \approx \left(f_{px} \cdot \frac{B}{d^2} \right) / \Delta d,$$

В качестве базовых параметров примем, что $f_{px} = 800$ px и $B = 12$ мм, соответствующие рабочей конфигурации. При субпиксельной точности локализации $\Delta d = 0,1$ px получаем значения, приведенные в таблице 4, которая вместе с рисунком 2 наглядно показывает, что при малых значениях диспарантности рабочая точность резко ухудшается, а при переходе в область $d \geq 15-20$ px чувствительность к ошибке Δd уменьшается в разы. Это подтверждает практическое требование: для контроля разновысотности порядка 5 мм система должна обеспечивать либо достаточно большой параллакс, либо очень малую ошибку субпиксельной локализации, а желательно – обе эти условия одновременно.

Геометрия съемки влияет на точность не менее существенно, чем параметры самой камеры. Увеличение высоты подвеса уменьшает масштаб изображения и снижает диспарантность, увеличение радиуса дуги при фиксированном угловом шаге повышает базис, но усиливает требования к точности выдерживания траектории, а отклонение оптической оси и наклон камеры вносят систематическое искажение в взаимное положение изображений.

ТАБЛИЦА 4. Расчетная чувствительность к ошибке диспарантности при $f_{px} = 800$ px и $B = 12$ мм

TABLE 4. Calculated sensitivity to disparity error at $f_{px} = 800$ px and $B = 12$ mm

Диспарантность d, px	ΔZ_d	
	при $\Delta d = 0,1$ px, мм	при $\Delta d = 0,2$ px, мм
5	38,4	76,8
10	9,6	19,2
15	4,3	8,5
20	2,4	4,8

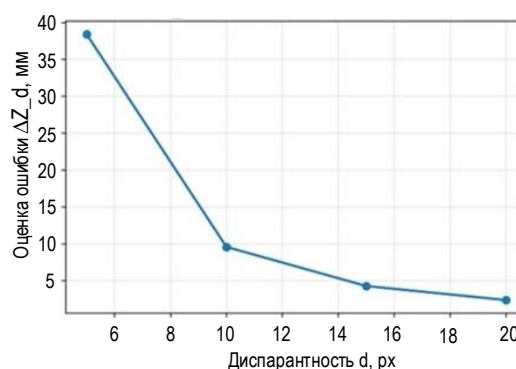


Рис. 2. Зависимость ошибки по высоте от диспарантности
Fig. 2. Height Error vs. Disparity

Проведенный анализ показывает, что точность определения разновысотности методом параллакс-сдвига определяется совместным действием параметров телевизионной камеры и геометрии съемки. Наиболее чувствительным фактором является ошибка определения диспарантности Δd .

Практическая реализация метода параллакс-сдвига требует предварительной калибровки телевизионной системы и целенаправленной компенсации систематических погрешностей. Внутренняя калибровка телевизионной камеры предусматривает определение эффективного фокусного расстояния f_{px} , координат главной точки на фотоматрице и коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии объектива. Некомпенсированная дисторсия приводит к систематическому смещению проекций объектов от их истинного положения, что вносит ошибку в определение диспарантности и, следовательно, в восстанавливаемые значения глубины и разновысотности. Внешняя калибровка определяет взаимное расположение камеры и системы координат объекта контроля, а также масштабный коэффициент, согласующий пиксельные координаты с физическими размерами. Полученные выводы по качеству существенно влияют на параметры телевизионных средств на точность представлены в таблице 5.

Ключевым источником систематической погрешности является неточность знания базиса B : ошибка ΔB вносит в итоговую разновысотность пропорциональную погрешность $\Delta h = \Delta h \cdot \Delta B / B$, линейно зависящую от измеряемой величины.

Компенсация этой ошибки достигается точным измерением геометрии перемещения камеры и применением калибровочных коэффициентов при вычислении Z_i . Устранение ошибки дисторсии производится путем корректирующего преобразования координат центров окружностей перед вычислением диспаратности с использованием коэффициентов, полученных при калибровке. Периодическая проверка системы по эталонным объектам с известными геометрическими параметрами позволяет контролировать стабильность калибровочных коэффициентов и вводить поправки при изменении рабочих условий, например вследствие температурного дрейфа параметров оптической системы.

ТАБЛИЦА 5. Качественное влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность
TABLE 5. Qualitative Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on Accuracy

Параметр	Рост параметра	Влияние на точность	Практический вывод
f	увеличивается	чувствительность растет	повышает масштаб, но сужает поле зрения
s	увеличивается	точность ухудшается	нужен малый пиксель при достаточном SNR
B	увеличивается	чувствительность растет	растут требования к геометрической стабильности
d	увеличивается	влияние Δd снижается	рабочая зона должна обеспечивать достаточный параллакс
Высота подвеса H	увеличивается	точность ухудшается	желательно ограничивать рост расстояния до сцены
Радиус дуги R	увеличивается	базис может расти	требуется жесткий контроль траектории
Наклон камеры α	увеличивается	систематическая ошибка растет	необходима стабилизация оси
ОСШ изображения	снижается	точность ухудшается (рост Δd)	адаптивная предобработка (CLAHE, фильтрация)

3. Численная оценка и допустимые диапазоны параметров измерительной системы

Аналитические зависимости, полученные в предыдущем разделе, позволяют установить не только направление влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности, но и рассчитать такие диапазоны параметров, при которых метод параллакс-сдвига сохраняет практическую приме-

нимость в задаче контроля головок ТВС. Для условий эксплуатации на АЭС это особенно важно, поскольку система должна не просто формально восстанавливать относительные высоты, а обеспечивать достоверное обнаружение отклонений порядка 5 мм.

В интересах оценки допустимых диапазонов параметров в качестве опорной принимается конфигурация, подтвержденная в материалах по реализации метода [5]: телевизионная камера с эффективным фокусным расстоянием порядка 800 px, базис перемещения между кадрами 10–15 мм, высота подвеса камеры 1200–1300 мм, дуговая траектория с контролируемым радиусом и субпиксельное определение центров окружностей головок ТВС. Наиболее устойчивые результаты были получены при $B = 12$ мм, что позволяет принять это значение как рациональное базовое для дальнейших расчетов.

С учетом полученных данных примем:

– $f_{px} = 800$ px; $B = 12$ мм;

– рабочую ошибку локализации $\Delta d = 0,1–0,2$ px;

– допустимую методическую погрешность $\Delta h_{\max} < 2,5$ мм.

Таблица 6 показывает высокую чувствительность модели к ошибке диспаратности, особенно при малых значениях d . Однако в практической системе измеряется относительная разновысотность группы регулярных объектов с использованием фильтрации по качеству сопоставления и отбора согласованных окружностей. Поэтому расчет по формуле чувствительности задает верхнюю оценку риска, тогда как реальная система использует дополнительные механизмы подавления ошибки. А на рисунке 3 представлено разделение диапазонов диспаратности.

ТАБЛИЦА 6. Расчетная оценка ошибки по высоте при различных значениях диспаратности

TABLE 6. Calculated Height Error Estimation at Various Disparity Values

d , px	ΔZ_d , мм	
	при $\Delta d = 0,1$ px	при $\Delta d = 0,2$ px
3	106,7	213,3
4	60,0	120,0
5	38,4	76,8
6	26,7	53,3
10	9,6	19,2
15	4,3	8,5
20	2,4	4,8



Рис. 3. Качественное разделение диапазонов диспаратности

Fig. 3. Qualitative Classification of Disparity Ranges

Из полученных оценок следует важный практический вывод. Диапазон $d = 3-6$ рх следует рассматривать как минимально достаточный рабочий диапазон, который может обеспечивать требуемую точность только при хорошей геометрической стабильности, фильтрации сопоставления и субпиксельной локализации центров. Для повышения запаса метрологической устойчивости предпочтительно обеспечивать увеличенную диспарантность, насколько это допускают условия съемки и поле зрения камеры.

Анализ показал, что при смещении камеры по высоте в диапазоне 1200 ± 100 мм достигается параллакс порядка 3–6 рх, обеспечивающий расчет с точностью около $\pm 1,3$ мм. При увеличении высоты подвеса свыше 1800–2000 мм параллакс становится настолько малым, что точное измерение заметно осложняется. Рациональная высота съемки лежит в диапазоне 1000–1300 мм. Для базиса перемещения наиболее устойчивые результаты были получены при $B = 12$ мм. Базис 10 мм обеспечивает работоспособность метода, но снижает величину параллакса и уменьшает запас по чувствительности. Базис 15 мм дает больший сдвиг изображения, но требует более жесткого контроля геометрии траектории и корректности сопоставления объектов между кадрами. Даже при рациональном выборе высоты подвеса и базиса перемещения точность измерения может быть утрачена при нарушении геометрии дугового движения камеры. Ошибка базиса линейно влияет на итоговую ошибку определения высоты. Основными причинами такой ошибки являются отклонение радиуса перемещения, нестабильность угла наклона камеры, колебания подвесной системы и нестабильность углового шага.

Численная оценка показывает, что работоспособность метода параллакс-сдвига в задаче контроля разновысотности головок ТВС определяется не одним отдельным параметром, а согласованностью всей измерительной конфигурации. Для уверенного контроля отклонений порядка 5 мм измерительная система должна обеспечивать методическую погрешность менее 2,5 мм, что в исследованной конфигурации достигается при высоте подвеса порядка 1000–1300 мм, базисе перемещения 10–15 мм с предпочтительным значением ≈ 12 мм, наличии устойчивой квазистереопары и субпиксельной локализации центров объектов. Наглядно это представлено в таблице 7.

Практическая реализация предложенного метода требует оценки вычислительной сложности алгоритма и требований к производительности обрабатывающей аппаратуры. Алгоритм обработки видеопотока включает следующие основные этапы: предварительная обработка кадра (нормализация яркости методом CLANE, шумовая фильтрация),

выделение окружностей методом кругового преобразования Хафа, субпиксельная локализация центров и расчет диспарантностей и разновысотностей. Вычислительная сложность предварительной обработки кадра составляет $O(N^2)$ по числу пикселей, преобразования Хафа для окружностей – $O(N^2 \cdot r)$, где r – диапазон перебираемых радиусов, субпиксельной локализации – $O(K)$ по числу выделенных окружностей, расчета разновысотностей – $O(M)$, где M – число головок ТВС в поле зрения. Доминирующим по сложности является этап преобразования Хафа [6].

ТАБЛИЦА 7. Рекомендуемые диапазоны параметров измерительной системы

TABLE 7. Recommended Parameter Ranges for the Measurement System

Параметр	Допустимый диапазон	Рациональное значение	Основание выбора
Фокусное расстояние f_{px}	порядка 800 рх	800 рх	подтверждено в экспериментальной конфигурации
Базис B	10–15 мм	12 мм	наиболее устойчивые результаты при 12 мм
Высота подвеса H	1000–1300 мм	1200 мм	минимум ошибки и достаточный параллакс
Диспарантность d	не менее 3–6 рх	5–6 рх и выше	минимально достаточная рабочая зона
Методическая погрешность Δh	< 2,5 мм	1,3–2,0 мм	необходима для контроля порога 5 мм
Геометрия траектории	контролируемая	симметричные пары	снижение систематической ошибки

Производительность системы должна обеспечивать полную обработку одного кадра за время, не превышающее период поступления следующего кадра. В отличие от систем видеонаблюдения реального времени, в задаче контроля ТВС перегруженная машина перемещается с малой угловой скоростью, что позволяет ограничиться частотой обработки 1–2 кадра в секунду и располагать бюджетом времени порядка 500–1000 мс на один кадр. При разрешении 768×576 рх современные одноплатные промышленные компьютеры обеспечивают выполнение полного алгоритма в пределах указанного бюджета. При необходимости увеличения частоты обработки кадров возможно применение аппаратного ускорения на основе GPU или специализированных программируемых логических интегральных схемах.

Заключение

В работе была дана оценка влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига. Показано, что при использовании одной телевизионной камеры, перемещающейся по дуговой траектории и формирующей квазистереопары последовательных кадров, точность определения разновысотности определяется согласованным выбором фокусного расстояния, базиса квазистереопары, высоты подвеса камеры, а также качеством определения диспаратности. Экспериментальные и расчетные материалы подтверждают, что при рациональной геометрии съемки метод обеспечивает инструментальную точность, достаточную для практического контроля отклонений головок ТВС без применения дополнительных контактных измерительных устройств.

На основе аналитической модели установлено, что наибольшее влияние на итоговую погрешность оказывает ошибка определения диспаратности Δd , причем чувствительность результата к этой ошибке возрастает при уменьшении величины параллакса. Это означает, что при малых значениях диспаратности даже субпиксельные ошибки локализации центров головок ТВС могут приводить к заметному ухудшению точности. Следовательно, одной из ключевых задач при проектировании измерительной системы является обеспечение такого диапазона параметров камеры и траектории движения, при котором формируется устойчивый квазистереоэффект и сохраняется достаточная величина диспаратности для надежного расчета относительных высот.

Проведенная численная оценка позволяет определить рациональные диапазоны параметров измерительной системы. Установлено, что при высоте подвеса камеры порядка 1000–1300 мм, базисе квазистереопары 10–15 мм с предпочтительным значением около 12 мм, а также при обеспечении

субпиксельной локализации центров объектов метод параллакс-сдвига позволяет достигать точности до $\pm 1,3$ мм и типичной рабочей погрешности порядка $\pm 2,0 \dots 2,5$ мм. При этих условиях обеспечивается уверенный контроль разновысотности головок ТВС на уровне 5 мм, что соответствует требованиям практической диагностики в условиях АЭС.

Таким образом, полученные результаты показывают, что эффективность метода параллакс-сдвига определяется не изолированным выбором одного параметра, а согласованием характеристик телевизионной камеры и геометрии ее перемещения. Практическая значимость исследования заключается в том, что установленные диапазоны параметров могут быть использованы при настройке телевизионных средств контроля ТВС и при обосновании требований к измерительной системе, предназначенной для бесконтактного определения разновысотности головок ТВС в условиях ограниченного пространства активной зоны реактора.

Вместе с тем, практическое применение метода требует учета ряда дополнительных условий. Точность субпиксельной локализации центров головок ТВС определяется не только параметрами телевизионных средств, но и качеством изображения: снижение ОСШ вследствие недостаточной освещенности активной зоны приводит к росту ошибки диспаратности и требует применения адаптивной предобработки кадра (нормализация яркости, шумовая фильтрация, контроль экспозиции). Устойчивость измерений также обеспечивается предварительной калибровкой телевизионной системы и компенсацией систематических погрешностей, прежде всего дисторсии объекта и ошибки знания базиса квазистереопары. Реализация полного алгоритма обработки не предъявляет жестких требований к производительности: при характерной скорости перемещения перегрузочной машины достаточно обрабатывать 1–2 кадра в секунду, что достижимо на современных промышленных вычислителях.

Список источников

1. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Оценка методической погрешности измерения разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8(157). С. 227–241. EDN:STQRKT
2. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Методика оценки погрешности измерения цифровой видеосистемой разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов // Физико-математические методы и информационные технологии в естествознании, технике и гуманитарных науках: Сборник материалов международного научного e-симпозиума (Москва, Российская Федерация, 27–28 декабря 2014 г.). Краснодар: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2015. 128 с. С. 61–76. EDN:RQBVJH
3. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Способы получения информации трехмерной сцены объекта для определения пространственного положения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 6(230). С. 117–128. DOI:10.18522/2311-3103-2022-6-117-128. EDN:VZOLOD
4. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Алгоритмическая обработка видеопотока и реализация метода параллакс-сдвига для бесконтактного контроля высоты объектов // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2025. № 4(168). С. 29–35. EDN:MOYUQI
5. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Метод параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС на основе видеопотока телевизионной камеры // Проектирование и технология электронных средств. 2025. № 4. С. 13–19. EDN:WTMLXG

6. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 4. С. 92–109. DOI:10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN:YKYWJR


References


1. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Estimates of the Error in the Height of the Strict Geometric Order of Objects Based on Digital Television Systems on the CCD. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014;8(157):227–241. (in Russ.) EDN:STQRKT
2. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Methods Estimating Uncertainty of Measurement Height of Objects in Strict Geometrical Order Using the Digital Video Systems. *Proceedings of the International Scientific e-Symposium on Physical and Mathematical Methods and Information Technologies in Natural Sciences, Engineering and Humanities*, Russian Federation, Moscow, 27–28 December 2014. Kirov: International Center for Scientific Research and Projects Publ.; 2015. p.61–76. (in Russ.) EDN:RQBVJH
3. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Methods of Obtaining Information About the Three-Dimensional Scene to Solve Problems of Determining the Spatial Position of Objects with a Regular Structure. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022; 6(230):117–128. (in Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2022-6-117-128. EDN:VZOLOD
4. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Algorithmic video stream processing and implementation of the parallax-shift method for non-contact height measurement of objects. *Oboronyj kompleks nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2025;4(168): 29–35. (in Russ.) EDN:MOYUQI
5. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Parallax-shift method for non-contact measurement of fuel assembly head height differences using television camera video stream. *Design and Technology of Electronic Equipment*. 2025;4:13–19. (in Russ.) EDN:WTMLXG
6. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera. *Vestnik SibGUTI*. 2025;19(4):92–109. (in Russ.) DOI:10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN:YKYWJR

Статья поступила в редакцию 06.04.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2026; принята к публикации 25.06.2026

The article was submitted 06.04.2025; approved after reviewing 29.05.2026; accepted for publication 25.06.2026

Информация об авторах:

СЕРДЮКОВ | аспирант института радиотехники, электроники и систем связи Южного федерального университета
Павел Сергеевич |  <https://orcid.org/0009-0003-1010-0902>

РУМЯНЦЕВ | доктор технических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного Федерального Университета
Константин Евгеньевич |  <https://orcid.org/0000-0001-7601-1505>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.395.44

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-72-80>

EDN:EMQKGN



Оценка предельного количества потребителей в домене TSN при заданных параметрах качества синхронизации

Николай Леонидович Сторожук, storozhuk.nl@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Для функционирования активно развивающегося в последние годы промышленного интернета вещей необходимо обеспечение обмена данными в режиме реального времени. Решить эту задачу оптимальным образом позволяет применение технологии построения сетей, чувствительных ко времени, которая является расширением классического Ethernet и призвана обеспечить более высокое качество передачи трафика, для которого задержки в сети недопустимы. Качественные параметры передачи определяются точностью временной синхронизации сетевых устройств, которая, в свою очередь, зависит и от их числа в домене, увеличение числа сетевых устройств в синхронизационном домене обычно ее снижает, поэтому исследование влияния количества потребителей на точность синхронизации является актуальной научно-практической задачей.

Цель: исследовать влияния количества потребителей на точность временной синхронизации в сетевых доменах и рассмотреть зависимость параметров качества синхронизации от количества ее потребителей в домене.

Методы: зависимость качества синхронизации шкалы времени от количества ее потребителей в домене оценивается по результатам имитационного моделирования процессов временной синхронизации в среде AnyLogic.

Результат. В работе показано, что точность синхронизации напрямую влияет на качественные параметры передачи данных, а увеличение нагрузки в виде количества запросов изначально ведет к заметному росту длительности цикла синхронизации. При этом дальнейшее увеличение нагрузки ведет к изменению характера функции распределения времени обработки, вплоть до проявления характера равномерного распределения на всем диапазоне значений.

Новизна: разработанные имитационные модели процессов сведения шкал времени позволяют оптимизировать соотношение количества потребителей синхронизации в домене с ее качественными параметрами.

Практическая значимость: описанные модели позволяют оценивать предельное количество потребителей в домене, при котором сохраняется заданное качество синхронизации, а также позволяют оценить время, которое необходимо на корректировку локальных часов рассматриваемого устройства, а изучение влияния количества потребителей на точность синхронизации позволяет разрабатывать более надежные и эффективные сетевые решения, адаптированные к современным требованиям к производительности и надежности.

Ключевые слова: синхронизация времени, TSN, PTP, gPTP, IIoT, шкала времени

Ссылка для цитирования: Сторожук Н.Л. Оценка предельного количества потребителей в домене TSN при заданных параметрах качества синхронизации // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 72–80. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-72-80. EDN:EMQKGN

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-72-80>
EDN:EMQKGH

Estimation of the Maximum Consumers Number in a TSN Domain with Synchronization Quality Parameters Set

 Nikolay L. Storozhuk, storozhuk.nl@sut.ru

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

Annotation

Relevance. The Industrial Internet of Things, which has been rapidly developing in recent years, is one of the technologies whose operation requires real-time data exchange. This challenge can be optimally addressed by using time-sensitive networking technology, which is an extension of classic Ethernet designed to ensure higher-quality traffic transmission where network delays are unacceptable. Transmission quality is determined by the accuracy of network devices time synchronization, which in turn depends on their number in domain. Therefore, studying the impact of the number of consumers on synchronization accuracy is a pressing scientific and practical challenge.

Objective. To examine the dependence of synchronization quality parameters on the number of its consumers in a domain. **Methods.** The dependence of time scale synchronization quality on the number of its consumers in a domain is assessed using the results of time synchronization processes simulation modeling within AnyLogic environment.

Result. The study demonstrates that an increase in the number of requests initially increases the synchronization cycle duration significantly. And its further increase in the load leads to the processing time distribution function nature change, till the entire range of values become distributed uniformly.

Novelty. The simulation models of timescale convergence processes developed makes able to optimize the ratio between the numbers of synchronization consumers in a domain to its quality parameters.

Practical Relevance. The models described make able to estimate the maximum number of consumers in a domain that maintains a given synchronization quality, as well as the time required to adjust the local device clock.

Keywords: time synchronization, TSN, PTP, gPTP, IIoT, timescale

For citation: Storozhuk N.L. Estimation of the Maximum Consumers Number in a TSN Domain with Synchronization Quality Parameters Set. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):72–80. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-72-80. EDN:EMQKGH

Введение

Согласно национальной стратегии цифрового развития искусственного интеллекта (ИИ), к 2030 г. в нашей стране доля отраслей с высоким уровнем внедрения ИИ вырастет до 95 %¹. В России, по данным опроса Ассоциации менеджеров, 39 % крупных предприятий уже используют ИИ-инструменты, а 25 % опрошенных планируют их внедрить в ближайшем будущем². Это означает, что в течение нескольких лет объем рынка платформ промышленного интернета вещей (IIoT, аббр. от англ.

Industrial Internet of Things) будет стремительно расти. IIoT является многоуровневой системой, включающей в себя установленные на узлах и агрегатах промышленных объектов датчики, контроллеры, исполнительные механизмы, а также средства передачи собираемых данных и команд управления. А для функционирования этой системы необходима телекоммуникационная сеть, обеспечивающая гарантированную и своевременную доставку передаваемой информации. Одна из основных проблем эксплуатации современных сетей –

¹ Указ Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации».

² «K2 НейроТех» назвал шесть ИИ-трендов в промышленности в 2025 году // Cnews. 2025. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2025-05-28_k2_nejroteh_nazval_shest (дата обращения 01.06.2026)

конвергенция пакетов систем передачи данных и мультимедийного трафика. Как следствие – резкое возрастание объема передаваемой информации [1]. А это, в свою очередь, приводит к увеличению задержек передачи и вероятности потери отдельных сообщений. Поэтому для эффективного контроля качества передачи цифрового сигнала в первую очередь необходимо выбрать критерий оценки [2]. Обеспечить обмен данными в системах IIoT на основе сетей Ethernet способна технология построения сетей, чувствительных ко времени (TSN, аббр. от англ. Time-Sensitive Networking).

TSN расширяет технологию Ethernet, включая в себя следующий ряд механизмов, необходимых для работы в режиме реального времени [3]:

- синхронизацию времени, обеспечивающую все элементы сетевой инфраструктуры единым высокоточным временем;
- планирование в режиме реального времени, позволяющее минимизировать задержки кадров с высоким приоритетом;
- резервирование и конфигурирование канала передачи данных, обеспечивающие резервирование потоков данных и организацию очередей.

Синхронизация сетевого оборудования по частоте и времени является одновременно фундаментальной целью и ключевым фактором в выполнении других функций TSN [4]. Таким образом, чтобы достаточно разветвленная сеть Ethernet с большим количеством узлов и устройств могла эффективно функционировать, в том числе при обработке трафика, чувствительного к задержкам, необходимо обеспечить ее строгую временную синхронизацию.

Архитектура коммутационного ядра Ethernet TSN

В общем случае система частотно временно обеспечения сети связи с коммутацией пакетов состоит из технических средств системы синхронизации шкал времени, а также средств связи, являющихся потребителями сигналов синхронизации [5]. Для сквозной передачи с жесткими временными рамками все устройства сети должны иметь общую систему отсчета времени и, следовательно, синхронизировать свои часы. Это справедливо не только для конечных устройств коммуникационных потоков, таких как промышленный контроллер и производственный робот, но и для сетевых компонентов, например, коммутаторов Ethernet. Только благодаря синхронизации часов всех сетевых устройств они могут работать согласованно и выполнять требуемые операции точно в нужный момент. Коммутационное ядро L2 Ethernet TSN играет ключевую роль в этих процессах. Оно обеспечивает передачу данных по всем портам. Каждый порт имеет необходимое число исходящих очередей, которые контролируются многоуровневым планировщиком.

Ядро построено на основе архитектуры общей буферной памяти, способной одновременно переключаться со скоростью проводного соединения на всех портах без блокировки³. Пакеты хранятся в общей буферной памяти в виде ячеек фиксированного размера как показано на рисунке 1.

Коммутационное ядро Ethernet TSN обеспечивает выполнение определенных функций³.

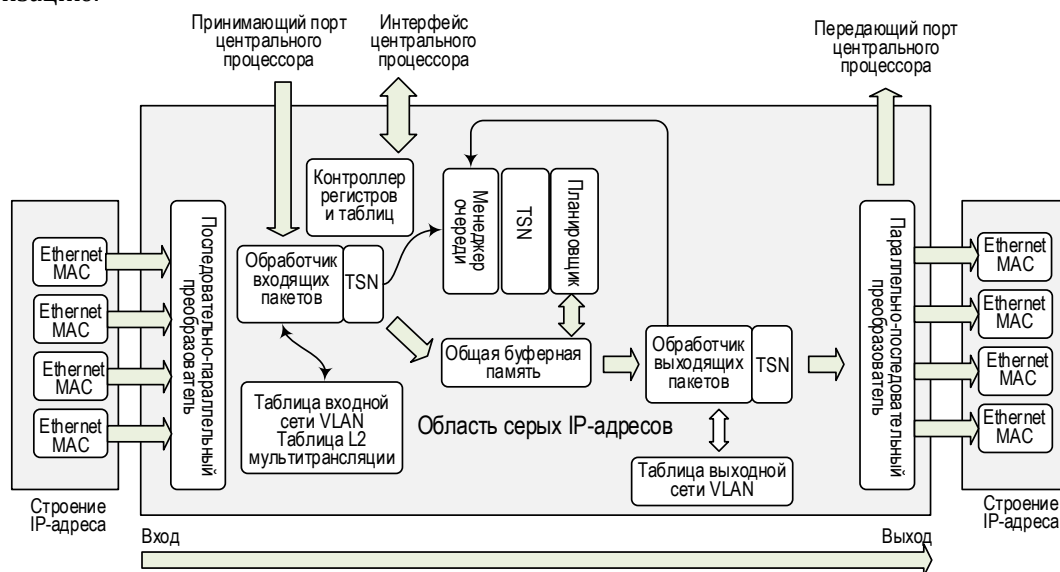


Рис. 1. Ядро коммутатора Ethernet TSN

Fig. 1. TSN Ethernet Switch Core

³ L2/L3 Ethernet TSN Switch Core an Example TSN Design. User Guide. 2024. URL: https://www.packetarc.com/datasheet_switch_tsn.pdf (дата обращения 01.06.2026)

Функция 1. Поддержка номинальной скорости передачи данных проводного соединения на всех портах и на всех размерах кадров Ethernet.

Функция 2. Хранение и пересылка состояния разделяемой памяти.

Функция 3. Поддержка больших пакетов размером до 32746 байт.

Функция 4. Поддержка сети, чувствительной ко времени.

Функция 5. Поддержка операций управления очередями, в т. ч. обеспечивается:

- отключение планирования пакетов на порт;
- отключение постановки новых пакетов в очередь к порту;
- разрешение опустошения порта без отправки пакетов;
- разрешение проверки занятости порта.

Функция 6. Зеркальное отображение входов и выходов.

Функция 7. Поддержка анализатора портов удаленного коммутатора.

Функция 8. Автоматическое обновление адресов L2.

Функция 9. Поддержка связующего дерева, проверки входящего и исходящего трафика.

Функция 10. Поддержка таблиц трансляции исходящих виртуальных локальных сетей (VLAN, *аббр. от англ.* Virtual Local Area Network), обеспечивающих уникальное преобразование идентификатора виртуальной локальной сети (VID, *аббр. от англ.* Virtual Local Area Network Identifier) для каждого исходящего порта.

Функция 11. Поддержка списка управления доступом (ACL, *аббр. от англ.* Access Control List), который определяет, кто может получать доступ к ресурсам и разрешенные действия, результатом которых может быть:

- назначение нескольких действий каждому результату, а все результаты могут быть получены параллельно;
- отбрасывание пакета;
- отправка пакета на определенный порт;
- обновление счетчика;
- отправка пакета в определенную очередь на выходном порту;
- присвоение «цвета» пакету, который используется измерителем / маркером / ограничителем, что позволяет определять действия с пакетами разного цвета;
- принудительное использование пакетом определенного VID при поиске таблицы VLAN;
- создание входного зеркала для пакета;
- запрет на получение пакета в таблице коммутации.

Функция 12. Поддержка настраиваемого механизма классификации и ACL.

Функция 13. Поддержка настраиваемого сопоставления исходящей очереди из битов, указывающих тип обслуживания или приоритет кадра.

Функция 13. Присутствие дефицитного-взвешенного циклического планировщика.

Функция 14. Контроль многоадресных и широко-вещательных штормов с помощью отдельных специализированных сегментов маркеров.

Если сформулировать кратко, то коммутационное ядро Ethernet TSN обеспечивает выполнение функций синхронизации времени, планирования трафика, резервирования и контроля ошибок.

Диаграмма состояний блока синхронизации

На зависящем от среды передачи – медиазависимом (MD, *аббр. от англ.* Media Dependent) – уровне порты получают с медианезависимого (MI, *аббр. от англ.* Media Independent) уровня данные, соответствующие видам сетевой технологии, к которой непосредственно подключен порт. Для описания процесса функционирования блока синхронизации коммутационного ядра TSN следует рассматривать MI уровень, описывающий взаимосвязи элементов процесса, локальные и глобальные переменные, которые им управляют. Устройство с реализованным в нем функционалом PTP, которое называют «экземпляром PTP», реализует функции выбора лучших часов и синхронизации. Данные функции включают параметры, специфические для конкретного порта, и параметры, которые относятся к экземпляру PTP в целом. Функции распределены между определенным множеством логических структур, которые совместно определяют поведение этого экземпляра. Так как указанные функции описываются конкретными конечными автоматами, то функционирование блока синхронизации в составе коммутатора TSN в целом можно описать таким же способом.

В стандарте IEEE 1588-2002 описаны следующие виды источников шкал времени [6]:

- гроссмейстерские часы (грандмастер – GM, *аббр. от англ.* Grandmaster) – основной источник точного времени;
- обычные часы (OC, *аббр. от англ.* Ordinary Clock) – устройство с одним портом, которое может быть ведущими часам или локальными ведомыми часами;
- ведущие часы (*от англ.* Master) – выступают в качестве источников точного времени для конечных устройств;
- ведомые часы (*от англ.* Slave) – конечные устройства, на которых необходимо осуществить синхронизацию времени по протоколу PTP;
- граничные часы (BC, *аббр. от англ.* Boundary Clock) – сетевое оборудование, которое выступает в качестве ведомого устройства для GM и источником точного времени для конечных устройств.

Функция временной синхронизации экземпляра РТР описывается с использованием конечных автоматов, их локальных переменных, взаимосвязей, глобальных переменных и структур, которые обеспечивают данные взаимосвязи. Для построения модели процесса используется мультиагентный подход в среде имитационного моделирования AnyLogic. Рассматриваемая имитационная модель отражает принципы функционирования экземпляра РТР при обработке информации о синхронизации на МI уровне. Логика выполнения модели описывается последовательностью процессов, которая приводится на рисунке 2.

Изображенные на рисунке блоки представляют собой конечные автоматы, которые реализуют различные функции и передают друг другу резуль-

таты их выполнения. Экземпляр РТР включает в себя объект *LocalClock*, который представляет собой автономные локальные часы, обеспечивающие для него общее время. *PortSyncSync* – это механизм синхронизации, позволяющий синхронизировать данные между портами на МI уровне.

Относительно этого объекта отсчитываются все предоставляемые временные метки, также он предоставляет значение *currentTime* (текущее время), которое используется в конечных автоматах для установки различных таймеров. Так как объект *LocalClock* не является конечным автоматом и сам по себе не реализует каких-либо функций, он и его связь с другими блоками экземпляра РТР на рисунке 2 показаны пунктиром. В таблице 1 приведено назначение каждого из этих объектов [7].

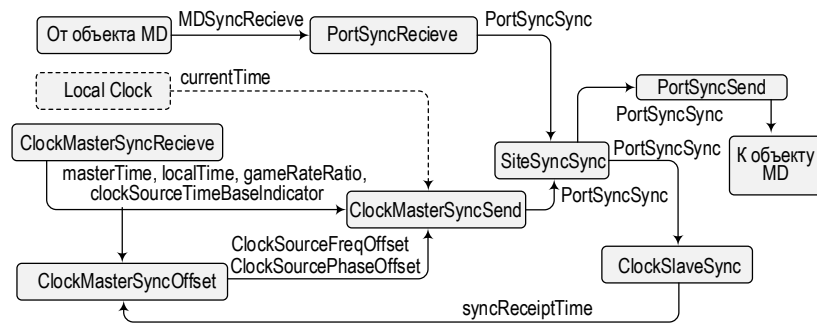


Рис. 2. Адаптированная диаграмма состояний блока синхронизации

Fig. 2. Adapted State Diagram of the Synchronization Block

ТАБЛИЦА 1. Назначение функциональных блоков модели (по одному на каждый экземпляр РТР)

TABLE 1. Purpose of the functional blocks of the model

Функциональный блок	Назначение блока
<i>ClockMasterSyncReceive</i>	Принимает функции <i>ClockSourceTime.invoke</i> от объекта <i>ClockSource</i> и уведомления о тактах объекта <i>LocalClock</i> ; обновляет <i>masterTime</i> и предоставляет <i>masterTime</i> конечным автоматам <i>ClockMasterSyncOffset</i> и <i>ClockMasterSyncSend</i>
<i>ClockMasterSyncOffset</i>	Принимает <i>syncReceiptTime</i> от объекта <i>ClockSlave</i> и <i>masterTime</i> от конечного автомата <i>ClockMasterSyncReceive</i> ; вычисляет сдвиги фазы и частоты между <i>masterTime</i> и <i>syncReceiptTime</i> (если экземпляр РТР не уровня GM) и передает сдвиги частоты и фазы конечному автомату <i>ClockMasterSyncSend</i>
<i>ClockMasterSyncSend</i>	Принимает <i>masterTime</i> от конечного автомата <i>ClockMasterSyncReceive</i> ; принимает сдвиги фазы и частоты между <i>masterTime</i> и <i>syncReceiptTime</i> от конечного автомата <i>ClockMasterSyncOffset</i> и передает <i>masterTime</i> , сдвиги фазы и частоты объекту <i>SiteSync</i> , используя структуру <i>PortSyncSync</i>
<i>PortSyncSyncReceive</i>	Принимает информацию о временной синхронизации от объекта MD порта РТР; вычисляет накопленное значение <i>rateRatio</i> ; вычисляет <i>syncReceiptTimeoutTime</i> и отправляет информацию объекту <i>SiteSync</i>
<i>SiteSync</i>	Принимает информацию о временной синхронизации, накопленном значении <i>rateRatio</i> и значении <i>syncReceiptTimeoutTime</i> от объекта <i>PortSync</i> текущего ведомого порта или от объекта <i>ClockMaster</i> и отправляет эту информацию объектам <i>PortSync</i> всех портов и объекту <i>ClockSlave</i>
<i>PortSyncSyncSend</i>	Принимает информацию о временной синхронизации от объекта <i>SiteSync</i> ; запрашивает у объекта MD порта РТР отправку связанного с временной синхронизацией сообщения о событии; принимает <i>syncEventEgressTimestamp</i> для этого сообщения о событии от объекта MD; использует последнюю информацию о временной синхронизации, полученную от объекта <i>SiteSync</i> , и временную метку, чтобы просчитать информацию о временной синхронизации, которая будет отправлена объектом MD в общем сообщении или в последующем сообщении о событии, и отправляет эту последнюю информацию объекту MD
<i>ClockSlaveSync</i>	Принимает информацию о временной синхронизации от объекта <i>SiteSync</i> ; вычисляет <i>clockSlaveTime</i> и <i>syncReceiptTime</i> ; устанавливает <i>syncReceiptLocalTime</i> , <i>gmTimeBaseIndicator</i> , <i>lastGmPhaseChange</i> и <i>lastGmFreqChange</i> ; отправляет <i>clockSlaveTime</i> объекту <i>ClockMaster</i> и предоставляет информацию объекту <i>ClockTarget</i> , позволяя этому объекту определить, имел ли место разрыв фазы или частоты

Как видно из рисунка 2, блоки передают друг другу данные либо в виде одной или нескольких глобальных переменных, либо в виде структур данных, состав которых определен стандартом IEEE 802.1AS. В таблице 2 приведены отдельные глобальные переменные, которые не входят в состав вышеназванных структур данных, но которыми также обмениваются автоматы, приведенные на рисунке 2 [7].

ТАБЛИЦА 2. Назначение глобальных переменных

TABLE 2. Assigning Global Variables

Наименование переменной	Назначение переменной
<i>clockSourceFreqOffset</i>	Сдвиг частоты объекта <i>ClockSource</i> относительно текущей частоты GM
<i>clockSourcePhaseOffset</i>	Разность между временем, показываемым объектом <i>ClockSource</i> , и синхронизированным временем
<i>clockSourceTimeBaseIndicator</i>	Глобальная переменная, значение которой объект <i>ClockMaster</i> устанавливает равным параметру <i>timeBaseIndicator</i> функции <i>ClockSourceTime.invoke</i> интерфейса приложения. Параметр <i>timeBaseIndicator</i> для <i>ClockSourceTime.invoke</i> задается объектом <i>ClockSource</i> и изменяется этим объектом всякий раз, когда изменяется его временная база
<i>currentTime</i>	Текущее значение времени относительно часов объекта <i>LocalClock</i> (т. е. текущее локальное время)
<i>gmRateRatio</i>	Измеренное отношение частоты объекта <i>ClockSource</i> к частоте объекта <i>LocalClock</i>
<i>localTime</i>	Значение <i>currentTime</i> в момент, когда последняя функция <i>ClockSourceTime.invoke</i> была получена от объекта <i>ClockSource</i> или когда объект <i>LocalClock</i> в последний раз обновил свое время
<i>masterTime</i>	Время, поддерживаемое объектом <i>ClockMaster</i> , на основе информации, полученной от объектов <i>ClockSource</i> и <i>LocalClock</i>
<i>syncReceiptTime</i>	Синхронизированное время, вычисляемое объектом <i>ClockSlave</i> в момент получения информации о временной синхронизации, содержащейся в структуре <i>PortSyncSync</i>

Моделирование работы локального источника шкалы времени

Для унификации процессов обмена информацией между различными блоками в рамках модели вышеописанные структуры данных и переменные представляются в виде обобщенных агентов, которые перемещаются между функциональными блоками и обрабатываются ими. Адаптированная диаграмма состояний блока синхронизации, представленная на рисунке 2, содержит набор функциональных блоков, которые взаимодействуют между собой в зависимости от роли устройства и типа получаемой информации. Каждый блок соответствует конечному автомату, который реализует заданную функцию и передает результат на последующие блоки, с которыми он имеет взаимосвязь. Данная взаимосвязь обеспечивается с помощью агентов, описываемых параметрами и обрабатываемых блоками.

Приведенная диаграмма соответствует описанию процесса функционирования блока синхронизации в общем, с учетом возможности выбора сценария функционирования. Необходимо понимать, что в зависимости от роли устройства в сети взаимосвязи между процессами перестраиваются, при этом различаются этапы обработки информации. В сети TSN выделяются конечный и пересылающий экземпляры RTP, которые можно отнести к соответствующему типу часов.

Конечный экземпляр RTP может рассматриваться как локальные ОС, а пересылающий – как ВС. Предлагаемая модель описывает процесс функционирования пересылающего экземпляра RTP, который соответствует ВС.

Задача ВС заключается в том, что они синхронизируют ОС от GM, получая информацию на ведомый порт, и после подстройки собственных часов отправляют сообщения синхронизации с остальных портов, которые функционируют как ведущие. Подстройка ОС предполагает, что, определяя смещение относительно GM, подсистема подстройки часов осуществляет постепенное изменение частоты, обеспечивая выравнивание шкалы путем уменьшения разности шкал на заданную величину шага изменения $T_{изм}^4$. Также может быть использован механизм половинного деления, при котором величина сдвига за цикл $T_{шаг}$ уменьшается вдвое до достижения заданной точности. Следовательно, математически процесс выравнивания шкалы времени (за один цикл подстройки) можно описать блок-схемой, которая приводится на рисунке 3а (для пошагового изменения) и блок-схемой на рисунке 3б (для метода половинного деления).

⁴ Как работает протокол синхронизации PTPv2 // Elec.ru. 2020. URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovye-tehnologii-svjaz-izmerenija/6015> (дата обращения 01.06.2026)

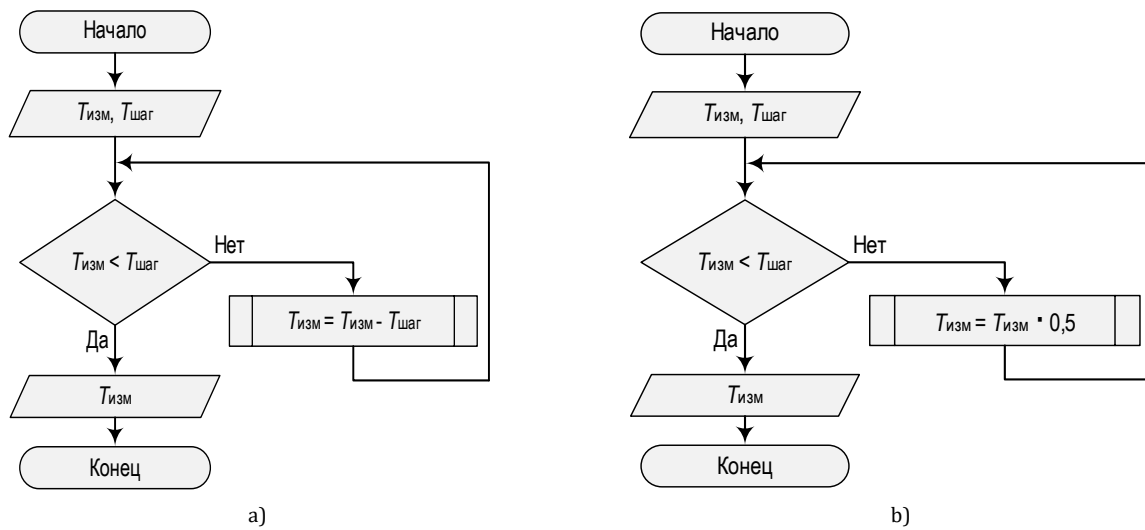


Рис. 3. Блок-схема подстройки локальных часов: а) при пошаговом изменении сдвига; б) при использовании механизма половинного деления

Fig. 3. Block Diagram of Local Clock Adjustment: a) with Step-by-Step Change of Shift; b) with Use of Half Division Mechanism

Здесь полагаем, что локальным часам известно начальное смещение относительно часов GM – $T_{изм}$. Процесс подстройки состоит в постепенном уменьшении величины этого смещения на заданный шаг $T_{шаг}$ (см. рисунок 3а) или делении временного промежутка на 2 (см. рисунок 3б). Величина начального сдвига определяет количество итераций, которые требуются для одного цикла подстройки. Когда величина смещения не превышает шага изменения, локальные часы синхронизированы.

Условия имитационного моделирования

Рассмотрим процесс функционирования имитационной модели, учитывая описанную логику процесса. На вход модели поступает агент, несущий информацию о том, какой сдвиг шкалы времени соответствует локальным часам относительно действующего в сети GM. Каждый блок, который участвует в процессе, обрабатывает агента в соответствии с заданными правилами.

Имитационная модель работы локального источника шкалы времени в коммутаторе сети TSN строится в соответствии с разделением на функции приложений, MI и MD уровни.

Анализ функционирования блока синхронизации производился при различных параметрах модели:

1) начальный сдвиг локальной шкалы времени в диапазоне:

- от 50 до 150 нс,
- от 250 до 350 нс,
- от 450 до 550 нс,
- от 950 до 1050 нс,
- от 2450 до 2550 нс;

2) методы подстройки:

- равномерный шаг,

- механизм половинного деления;
- при разном количестве потребителей, а следовательно, и при различной загрузке элемента SiteSyncSync, поступающими запросами, где величина вызванной задержки распределена по нормальному закону, описываемому параметрами среднееквадратическое отклонение (СКО) и математическое ожидание (МО):

$$\text{СКО } \sigma = 5, \text{ МО } \mu = 25,$$

$$\text{СКО } \sigma = 5, \text{ МО } \mu = 75,$$

$$\text{СКО } \sigma = 50, \text{ МО } \mu = 75.$$

Моделирование синхронизации при изменении начального сдвига

Имитационное моделирование проводится следующим образом: для каждого диапазона значений начального сдвига, где он сгенерирован как случайная величина, получено пять реализаций моделирования, которые показали определенный результат.

Среднее значение времени выполнения цикла синхронизации для экземпляра RTP (в установленном режиме) составляет примерно 155 нс. Значение начального сдвига не оказывает существенного влияния на среднее значение времени реализации цикла и его дисперсию, а СКО времени реализации цикла для установленного режима находится в пределах 60 нс.

Наличие начального сдвига между GM и ведомыми часами ведет к появлению длительного периода начальной подстройки, который в среднем в 8–10 раз превышает данное значение начального сдвига.

При устоявшемся режиме наблюдается наличие двух устойчивых мод в составе распределения времени синхронизации, что может быть результатом ухода часов, кратного шагу подстройки. Двухмодальность проявляется не во всех экспериментах. Несмотря на наличие больших значений начального сдвига, алгоритм конечного автомата экземпляра РТР приводит к устойчивому режиму удержания синхронизации.

Внутри одного эксперимента пять самостоятельных реализаций подстройки локальных часов отражают корректность и адекватность сформированной модели, выбранных законов распределения случайных величин, что следует из независимого характера полученных результатов для каждой из реализаций.

Моделирование синхронизации при различных методах подстройки

Между локальными часами и GM в разные периоды присутствует расхождение шкал времени. В начальный момент времени это расхождение может быть довольно большим, в процессе синхронизации оно становится менее значительным. Но для любого варианта экземпляра РТР реализует процедуру синхронизации в итеративном режиме, где на каждом шаге уменьшается расхождение шкал, проверяется полученный результат и выдается новое значение для коррекции шкалы локальных часов.

Данная циклическая процедура может характеризоваться как скоростью сходимости (длительностью цикла реализации), так и значением точности, в том числе реализацией монотонности процедуры коррекции часов. Не удалось найти информации в явном виде о выбранных методах и алгоритмах реализации процедуры сведения шкал при перенесении выше противоречивых требованиях ни в отечественных, ни в зарубежных публикациях. Также вероятно, что при различных начальных условиях возможна различная оптимальность применения различных алгоритмов коррекции шкал времени.

Были смоделированы два алгоритма: с равномерной подстройкой и основанный на методе половинного деления.

В результате проведенного моделирования выяснилось, что для режима первичной корректировки разные методы подстройки существенно различаются. Например, для случая начальной расстройки 2450–2550 нс СКО: для алгоритма с равномерным шагом составляет 2575 нс, для метода половинного деления и 100 нс, а в установившемся режиме СКО: для алгоритма равномерной подстройки – 150 нс, а для алгоритма с половинным делением 145 нс.

Для установившегося режима среднее время выполнения цикла подстройки составляет около 155 нс и для механизма равномерной подстройки, и для метода половинного деления. Следовательно, алгоритм влияет на длительность первичной подстройки, не вызывая значительных отклонений в установившемся режиме. Величина СКО длительности цикла при этом равна примерно 60 нс.

Сравнивая различные методы подстройки, можно сделать вывод, что метод половинного деления показал более высокую эффективность. Так, при малых значениях начального сдвига выигрыш составляет 10–20 %, при больших значениях расстройки выигрыш в десятки раз превышает первый метод.

Моделирование синхронизации при изменении количества запросов

Так как контроль выполнения цикла подстройки выполняет блок *SiteSyncSync*, то на него поступают входящие запросы. Увеличение количества запросов увеличивает время их обработки. Следовательно, изменение нагрузки отразится на длительности задержки в работе блока *SiteSyncSync*.

Моделирование показало, что изменение параметров рассматриваемого блока меняет поведение модели. Так при небольших значениях СКО и МО величины задержки, вызванной поступающими запросами, наблюдается выброс значений времени вхождения в синхронизм в районе 700–1300 нс, который обусловлен первичной подстройкой. При этом в установившемся режиме распределение времени вхождения в синхронизм носит многомодальный характер со значением МО около 155 нс и СКО 55 нс.

Дальнейшее увеличение МО приводит к тому, что модальность сохраняется, но положение мод смещается в сторону увеличения времени выполнения цикла подстройки. Выброс, характерный для времени первичного цикла подстройки, смещается за 1000 нс, что говорит об увеличении времени для достижения синхронизации.

При больших значениях СКО ($\sigma = 50$) положение выброса незначительно смещается в сторону увеличения, но характер распределения времени в установившемся режиме изменяется: исчезает многомодальность. Это обусловлено увеличением общей дисперсии, которая зависит от параметров процесса *SiteSyncSync*.

Следовательно, увеличение нагрузки в виде количества запросов изначально ведет к заметному росту дисперсии длительности цикла синхронизации. При этом дальнейшее увеличение нагрузки ведет к изменению характера функции распределения времени обработки вплоть до проявления характера равномерного распределения на всем диапазоне значений.

Результат моделирования по данному параметру показывает, что блок *SiteSyncSync* является ключевым и его производительность в наибольшей мере влияет эффективность экземпляра РТР.

Заключение

Полученная модель функционирования модуля синхронизации позволяет оценить время, которое необходимо на корректировку локальных часов рассматриваемого устройства. Так как моделирование выполнялось для граничных часов, которые в терминологии TSN соответствуют пересылаю-

щему экземпляру РТР, часть блоков не задействована. При необходимости (рассмотрении сценариев работы коммутатора) модель может быть откорректирована. За основу построения взята диаграмма состояний. Модель экземпляра РТР и процессов его функционирования является ключевой для реализации моделей верхнего уровня, а именно взаимодействия различных видов экземпляров РТР и реализации сетевых режимов их работы. Таким образом, подобное моделирование может позволить оценивать предельное количество потребителей в домене TSN, при котором сохраняется заданное качество синхронизации.

Список источников

1. Бугров Д.А., Сторожук Н.Л. Применение эволюционного метода для оптимизации магистральной сети связи // Электросвязь. 2007. № 5. С. 30–33. EDN:IADPFX
2. Власов И.И., Новиков Э.В., Птичников М.М., Сторожук Н.Л. Цифровые сети связи. Кабельные и волоконно-оптические линии. М.: ФАЗИС, 2008. 500 с.
3. Берёзкин А.А., Паршин А.А., Парфенов Д.Д., Киричек Р.В. Анализ стандартов сетей, синхронизируемых по времени, для управления роботизированными системами в режиме реального времени // Электросвязь. 2023. № 6. С. 20–31. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
4. Сторожук М.Н., Киричек Р.В. Обзор систем мониторинга для протокола TSN // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. 2022. № 1. С. 131–132. EDN:IHIAET
5. ГОСТ Р 71148-2023. Требования по построению систем синхронизации сетей связи: сетей связи с коммутацией каналов, сетей связи с коммутацией пакетов. М.: Российский институт стандартизации, 2024.
6. IEEE Std 1588™-2002. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE, 2002. DOI:10.1109/IEEESTD.2002.94144
7. IEEE Std 802.1AS™-2020. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications. IEEE, 2020. DOI:10.1109/IEEESTD.2020.9121845

References


1. Bugrov D.A., Storozhuk N.L. Applying the Evolution Method to Optimize a Main Communication Network. *Electrosvyaz*. 2007;5:30–33. (in Russ.) EDN:IADPFX
2. Vlasov I.I., Novikov E.V., Ptichnikov M.M., Storozhuk N.L. *Digital Communication Networks. Cable and Fiber-Optic Lines*. Moscow: FAZIS Publ.; 2008. 500 p. (in Russ.)
3. Berezkin A.A., Parshin A.A., Parfenov D.D., Kirichek R.V. Analysis of Time-Synchronized Network Standards for Real-Time Control of Robotic Systems. *Electrosvyaz*. 2023;6:20–31. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
4. Storozhuk M.N., Kirichek R.V. Overview of Monitoring Systems for the TSN Protocol. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day*. 2022;1:131–132. (in Russ.) EDN:IHIAET
5. GOST P 71148-2023. *Requirements for the construction of synchronization systems of communication networks: circuit-switched communication networks, packet-switched communication networks*. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ.; 2024. (in Russ.)
6. IEEE Std 1588™-2002. *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*. IEEE; 2002. DOI:10.1109/IEEESTD.2002.94144
7. IEEE Std 802.1AS™-2020. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications*. IEEE; 2020. DOI:10.1109/IEEESTD.2020.9121845

Статья поступила в редакцию 30.03.2026; одобрена после рецензирования 13.04.2026; принята к публикации 21.04.2026

The article was submitted 30.03.2026; approved after reviewing 13.04.2026; accepted for publication 21.04.2026

Информация об авторе:

**СТОРОЖУК
Николай Леонидович**

кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-7463-502X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.75

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-81-97>

EDN:AGSSRU



Туманные альянсы: децентрализованная облачная структура с федеративным машинным обучением для городских сетевых вселенных

✉ Данг Ван Тханг, dang.vt@sut.ru

✉ Артём Николаевич Волков, artem.nv@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. В последние годы интеллектуальные транспортные системы играют важную роль в управлении городом и снижении транспортных рисков, став одной из инфраструктурных технологий для будущих городских сетевых вселенных. Одной из ключевых задач является повышение эффективности систем в части точного прогнозирования транспортного трафика в реальном времени. Традиционные централизованные модели глубокого обучения страдают от задержек в сети и уязвимости центрального сервера как по безопасности, так и по вычислительной нагрузке.

Целью работы является разработка децентрализованной облачной структуры на основе динамических туманных вычислений и федеративного машинного обучения для прогнозирования трафика в ИТС, устраняющей зависимость от центрального сервера и обеспечивающей отказоустойчивость системы. В интересах достижения цели исследования в работе используются **методы** анализа существующих публикаций в предметной области, математического моделирования и программного моделирования (верификация модели на реальных данных) для оценки результатов. Предлагаемая облачная структура объединяет три технологии: децентрализованное федеративное обучение, туманные вычисления и адаптивные графовые сверточные рекуррентные сети.

Результат. Предложенная структура эффективно работает без центрального сервера. На наборах ReMSD4 и ReMSD7(M) потребность в сетевых ресурсах снижена на 48 % по сравнению с традиционными методами FL, скорость сходимости выше на 17,8 %, точность прогноза сопоставима с моделями, использующими центральный сервер. Предложена **новая** децентрализованная архитектура, полностью исключая центральный сервер при сохранении баланса между точностью, эффективностью и потреблением сетевых ресурсов.

Теоретическая значимость. Подтверждена обоснованность интеграции динамических туманных вычислений с децентрализованным федеративным обучением. Применение AGCRN на уровне туманных узлов обеспечивает точное моделирование пространственно-временных зависимостей без передачи сырых данных и без участия центрального сервера.

Практическая значимость. Результаты экспериментов подтверждают применимость решения в масштабных ИТС умных городов, особенно при ограниченной пропускной способности сети, разрывах соединения с облаком и перегрузке центрального сервера.

Ключевые слова: прогнозирование транспортных потоков, децентрализованное федеративное обучение, туманные вычисления, AGCRN, транспортные системы

Ссылка для цитирования: Тханг Д.В., Волков А.Н. Туманные альянсы: децентрализованная облачная структура с федеративным машинным обучением для городских сетевых вселенных // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 81–97. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-81-97. EDN:AGSSRU

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-81-97>

EDN:AGSSRU

Fog Alliances: A Decentralized Cloud Structure with Federated Machine Learning for Citiverses

✉ Dang V. Thang, dang.vt@sut.ru

Artem N. Volkov, artem.nv@sut.ru

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

Annotation

Relevance. In recent years, Intelligent Transportation Systems (ITS) have played a pivotal role in urban management and the reduction of transportation risks, having become a key infrastructure technology for future urban network universes (Citiverse). A key challenge is enhancing system efficiency through accurate, real-time traffic prediction. Traditional centralized deep learning models suffer from network propagation delays and vulnerability of the central server in terms of both security and computational overload.

Objective. To develop a decentralized cloud framework based on dynamic fog computing and federated machine learning for traffic prediction in ITS, eliminating dependency on a central server and ensuring system fault tolerance through the proposed architecture.

Methods. The study employs literature analysis in the subject area, mathematical modeling, and computational experiments for performance evaluation. The proposed cloud framework integrates three technologies: Decentralized Federated Learning, Fog Computing, and Adaptive Graph Convolutional Recurrent Networks.

Results. The proposed framework operates effectively without a central server. Experiments on the real-world datasets PeMSD4 and PeMSD7(M) show that the model reduces communication overhead by approximately 48% compared to traditional FL methods. Convergence speed is significantly faster (a 17.8% reduction in the loss function during initial training rounds), while prediction accuracy remains at a competitive level compared to models relying on a central server. A **novel decentralized system** architecture is proposed that eliminates the central server while maintaining a balance among prediction accuracy, model efficiency, and network resource consumption.

Theoretical Significance. The study confirms the theoretical validity of integrating dynamic fog computing with decentralized federated learning. Implementing this approach using AGCRN at the fog node level enables accurate modeling of complex spatio-temporal dependencies, while eliminating the need for raw data transmission and central server involvement.

Practical Significance. Experimental results on real-world datasets confirm the feasibility of deploying the proposed solution in large-scale ITS within smart cities. The solution is particularly effective under conditions of limited network bandwidth, connectivity disruptions with the cloud, and overload of the central server.

Keywords: time synchronization, TSN, PTP, gPTP, IIoT, timescale

For citation: Thang D.V., Volkov A.N. Fog Alliances: A Decentralized Cloud Structure with Federated Machine Learning for Citiverses. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):81–97. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-81-97. EDN:AGSSRU

Введение

Стремительное расширение городских агломераций и усложнение транспортной инфраструктуры ставят перед муниципальным управлением принципиально новые задачи. Одним из ключевых направлений их решения стало создание интеллектуальных транспортных систем (ITS, аббр. от

англ. Intelligent Transportation Systems) – технологической основы концепции умного города [1] и ее перспективного развития в форме городских сетевых вселенных (от англ. CitiVerse) [2]. Именно системы управления дорожным движением обеспечивают в этой структуре согласованное функционирование городских ресурсов.

Задача анализа и прогнозирования транспортных потоков в условиях реального города отличается высокой вычислительной сложностью: она предполагает обработку непрерывных потоков данных и выявление многомерных пространственно-временных зависимостей. В современных исследованиях для захвата пространственных закономерностей широко применяются графовые нейронные сети (GNN, *аббр. от англ.* Graph Neural Networks), тогда как для описания временной динамики традиционно используются рекуррентные (RNN, *аббр. от англ.* Recurrent Neural Networks) и сверточные (CNN, *аббр. от англ.* Convolutional Neural Networks) нейронные сети [3]. Эти методы эффективно моделируют пространственно-временные связи и показывают хорошие результаты в задачах прогнозирования. Однако остаются вопросы, связанные с объемом необходимых вычислительных ресурсов, удобством развертывания системы и общей ее эффективностью. В реальных условиях оценка модели машинного обучения требует баланса между точностью прогноза, объемом необходимых ресурсов на обработку данных, передачу данных и другими факторами.

Большинство современных моделей глубокого машинного обучения используют централизованные архитектуры в облачной среде. Такие решения требуют передачи данных в облако, что значительно увеличивает сетевой трафик и эксплуатационные расходы системы. Более того, переход к сетям 6G/IMT-2030 предъявляет более строгие требования к услугам класса сверхнадежных сетей связи с ультрамалыми задержками. Эти характеристики необходимы для поддержки новых сервисов, таких как телеприсутствие и голографическая связь, а также для формирования новой среды – мультивселенной (группы подключенных сетевых вселенных). Как отмечалось выше, традиционные централизованные модели облачных вычислений не способны в полной мере удовлетворить эти требования [4].

Туманные вычисления и федеративное обучение (FL, *аббр. от англ.* Federated Learning) стали ключевыми подходами к решению этих проблем. Туманные вычисления переносят обработку данных ближе к их источникам на периферии сети, снижая затраты на передачу и уменьшая задержки связи. В сочетании с этим FL повышает точность модели с каждым раундом обучения, при этом данные не передаются в облако, что обеспечивает конфиденциальность данных и снижает сетевую нагрузку. В последних исследованиях в области FL представлен ряд методов, использующих пространственно-временные характеристики транспортных потоков, среди которых выделяются работы FedAGCN [5], FedSTN [6], T-GCN [7], FASTGNN [8], FCGCN [9]. Результаты этих работ подтверждают эффективность этих методов на реальных данных. Однако боль-

шинство подобных моделей построены на основе традиционной централизованной облачной архитектуры, в которой сервер остается центральным узлом агрегации, накопления данных, обучения и распределения модели. Что создает высокую нагрузку на каналы связи и ресурсы сервера, повышает риски безопасности и снижает устойчивость к сбоям [10, 11]. Кроме того, централизованное обучение модели не учитывает региональные особенности трафика, которые сильно различаются в разных географических зонах.

Для преодоления этих вызовов в данной статье предлагается структура DFL-FC-AGCRN – децентрализованный подход к прогнозированию трафика без использования центрального сервера. Метод объединяет три технологии: 1) децентрализованное FL для распределенного обучения; 2) туманные вычисления для переноса расчетов к источникам данных и снижения зависимости от центрального облака; 3) адаптивная рекуррентная графовая сверточная нейронная сеть (AGCRN, *аббр. от англ.* Adaptive Graph Convolutional Recurrent Network) для описания сложных пространственно-временных зависимостей [12].

Предлагаемая архитектура является иерархически децентрализованной: единый облачный сервер полностью исключается, а координация выполняется через узлы AFN, образующие промежуточный уровень между датчиками и облаком.

В статье представлены следующие основные результаты работы:

- разработана децентрализованная структура DFL-FC-AGCRN для прогнозирования трафика, исключая зависимость от центрального сервера;
- разработан механизм отдельной агрегации параметров, обеспечивающий баланс между глобальными знаниями (общие параметры модели) и локальной адаптацией (индивидуальные векторы встраивания узлов);
- предложен метод кластеризации для оптимизации размещения туманных узлов на основе плотности пространственного распределения датчиков трафика;
- произведена комплексная оценка точности прогноза и используемых сетевых ресурсов.

Обзор работ

Методы глубокого обучения, такие как CNN, RNN и GNN, были представлены в работах [13], [14]. Результаты обучения на реальных наборах данных показали, что применение этих методов к задачам с транспортными данными обеспечивает достаточно высокую точность. В другой работе [12] авторы представили и доказали высокую эффективность модели AGCRN в задаче прогнозирования на основе пространственных и временных образцов данных. Тем не менее, перечисленные

модели прогнозирования требуют передачи больших объемов необработанных данных на центральный сервер.

В работах [5, 6, 15] представлены методы, основанные на обучении общей модели без передачи исходных данных: клиенты обмениваются только параметрами (весами) нейронной сети. Этот подход, включающий алгоритмы FedAvg и FedSTN, повышает уровень защиты данных. Однако общим ограничением остается зависимость от традиционной облачной архитектуры, где сервер выполняет функции агрегации и распределения параметров. Данные методы не исключают риски единой точки отказа и потребности в сетевых ресурсах, что может стать «узким местом» в случае повышения количества данных при обмене с центральной моделью ML. Также данный метод недостаточно учитывает специфику локальных данных в разных географических зонах [10, 11]. В некоторых исследованиях рассматривалась децентрализация с помощью блокчейна [15]. Однако это решение существенно увеличивает потребности в вычислительных ресурсах и в итоге затрудняет работу системы FL в реальном времени.

Параллельно развиваются полностью децентрализованные методы FL, не требующие центрального сервера агрегации. Авторы исследования [16] предложили алгоритм D-PSGD, в котором каждый узел обменивается параметрами только с топологически смежными узлами сети, показав, что децентрализованные алгоритмы могут превосходить централизованные по скорости сходимости в условиях ограниченной пропускной способности. В работе [17] предложен подход на основе сегментированного gossip-протокола для FL с использованием блокчейна, позволяющий эффективно использовать пропускную способность между узлами без привлечения центрального сервера агрегации. В статье [18] разработан алгоритм CD-SGD, сочетающий компрессию градиентов и компенсацию задержек для повышения эффективности децентрализованного обучения. Однако перечисленные методы оперируют абстрактными топологиями сети и не учитывают географическую структуру узлов. Кроме того, они не включают специализированных архитектур для пространственно-временного моделирования транспортных потоков и не решают проблему неоднородности данных (Non-IID), характерную для территориально распределенных датчиков. Предлагаемый подход отличается интеграцией географической кластеризации (HDBSCAN, K-means) с моделью AGCRN на уровне туманных узлов, что обеспечивает адаптацию к реальной топологии транспортной сети и эффективное решение проблемы Non-IID через механизм раздельной агрегации параметров.

Предлагаемая общая структура DFL-FC-AGCRN

Сеть дорожных датчиков состоит из измерительных станций, размещенных по всей исследуемой территории. Каждая станция рассматривается как вершина, которая собирает данные о трафике в реальном времени.

Пусть набор станций: $G = \{G_k\}_{k=1}^K$ где K – число измерительных станций трафика.

Тогда каждая станция G_k формирует данные временного ряда:

$$D_k = \{(X_k, y_k)\},$$

где X_k – входная последовательность признаков на станции k :

$$X_k = \{x_k^t\}_{t=1}^T \in \mathbb{R}^{T \times d};$$

T – число временных шагов; d – число признаков; y_k – соответствующий объем трафика на станции k :

$$y_k = \{y_k^t\}_{t=1}^T \in \mathbb{R}^T.$$

Важная особенность данных о трафике – высокая неоднородность (non-IID) между измерительными станциями. Это связано с различиями в состоянии дорог, плотности транспорта и шаблонах движения в разных районах. По этой причине наборы данных будут иметь существенные различия, что и является серьезным вызовом при применении моделей распределенного обучения. Общая концепция предлагаемой архитектуры DFL-FC-AGCRN, включающей измерительные станции, туманные узлы, альянсы и механизм децентрализованной агрегации, представлена на рисунке 1.

Кластеризация датчиков с помощью HDBSCAN

По сути, иерархическая пространственно-плотностная кластеризация на основе плотности с учетом шума (HDBSCAN, аббр. от англ. Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) является алгоритмом кластеризации без учителя. Алгоритм использует несколько масштабов расстояния, что позволяет отделять плотные кластеры от разреженных областей, интерпретируемых как шум. Стоит отметить, что этот метод сильно зависит от самих данных и требует меньше параметров, задаваемых пользователем. По вычислительной сложности алгоритм сопоставим с DBSCAN, но часто превосходит K-means и другие методы при кластеризации крупномасштабных данных [19]. Таким образом, в проводимом исследовании был выбран HDBSCAN как метод для кластеризации сложных сетей датчиков трафика.

Процедура HDBSCAN включает определенные шаги.

Шаг 1. Вычисление попарной матрицы расстояний между станциями по формуле гаверсина (1), где R – радиус Земли (≈ 6371 км); ϕ_1, ϕ_2 и λ_1, λ_2 – широта и долгота двух точек (в радианах).



Рис. 1. Концептуальная схема архитектуры DFL-FC-AGCRN в умном городе
 Fig. 1 Simulation Diagram of the DFL-FC-AGCRN Framework Architecture in a Smart City

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right). \quad (1)$$

Шаг 2. Построение минимального остовного дерева (MST, аббр. от англ. Minimum Spanning Tree) на основе матрицы расстояний. Каждая вершина графа соответствует измерительной станции, а вес каждого ребра определяется гаверсиновым расстоянием между соответствующими станциями. MST соединяет все точки с минимальной суммарной длиной ребер и служит основой для построения иерархии.

Шаг 3. Построение иерархии кластеров с использованием расстояния взаимной достижимости. Начиная с минимального остовного дерева MST, алгоритм модифицирует ребра с учетом плотности и формирует «сжатое» дерево кластеров. Каждое горизонтальное сечение дерева соответствует определенному значению ε и задает кластеры на соответствующем уровне плотности.

Шаг 4. Выделение устойчивых кластеров путем отсекания иерархии на оптимальном уровне. HDBSCAN просматривает дерево и ищет наиболее «устойчивые» подкластеры по критерию стабильности (например, избыток массы или кластерная стойкость). На выходе алгоритм дает набор

наиболее стабильных кластеров и помечает точки, не входящие ни в один кластер, как шум.

Для алгоритма HDBSCAN не требуется заранее задавать число кластеров. Он автоматически находит оптимальное разбиение на основе структуры данных. Это особенно важно для сценария кластеризации измерительных станций трафика, где оптимальное число кластеров заранее неизвестно и зависит от пространственного размещения станций. Параметры алгоритма HDBSCAN, использованные в настоящем исследовании, приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры HDBSCAN
 TABLE 1. HDBSCAN Parameters

Имя	Определение	Диапазон	Примечание
Минимальный размер кластера, mcs	Минимум точек в кластере	[2, 20]	Влияет на число кластеров и долю шума
Коэффициент ядра, α	Фактор для min_samples	[0.5, 0.7]	Настраивает «жесткость» плотности
Минимум core-точек, mins	mins = [α · mcs]	-	Чем больше mins, тем плотнее кластеры

Размещение туманных узлов

После кластеризации центр каждого кластера C_n вычисляется как среднее значение координат:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{|C|} \sum_{i \in C} \phi_i, \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{|C|} \sum_{i \in C} \lambda_i. \quad (2)$$

Туманный узел F_n размещается на станции, которая находится ближе всего к центру кластера. Это обеспечивает выгодное положение для сбора и обработки данных от всех станций в кластере. Размещение туманного узла в центре минимизирует среднее расстояние до станций, снижает задержку распространения и экономит энергию узлов.

В исследовании для верификации разработанной структуры и метода были использованы два реальных набора данных: PeMSD4 с 207 датчиками трафика и PeMSD7(M) с 228 датчиками [20]. Данные содержат измерения трафика в реальном времени и географические координаты датчиков.

AGCRN на каждом туманном узле

Предложенная в [12] AGCRN является продвинутой архитектурой модели машинного глубокого обучения для прогноза транспортных потоков. Она устраняет два основных недостатка прежних методов: во-первых, использование только глобально разделяемых параметров, которые не отражают индивидуальные паттерны узлов; во-вторых, зависимость от заранее заданного графа для моделирования пространственных связей.

Для каждого туманного узла F_n строится локальный граф $G_n = (V_n, E_n)$. $V_n = \{s_i \mid s_i \in C_n\}$ – множество вершин, где каждая вершина соответствует измерительной станции (датчику), входящей в кластер C_n ; общее число станций в кластере равно $|V_n|$. E_n – множество ребер, отражающих пространственные связи между станциями.

Построенный таким образом локальный граф отражает топологическую структуру транспортной сети в пределах кластера C_n , предоставляя модели возможность учитывать пространственные зависимости между станциями-соседями. Принципиально важно разграничить роли элементов графа: вершины V_n соответствуют измерительным станциям (датчикам), тогда как туманные узлы в граф не включаются – каждый туманный узел F_n выступает координатором процесса обучения на графе G_n своего кластера. Модель AGCRN интегрирует два специализированных модуля в архитектуру RNN, что позволяет совместно моделировать пространственные и временные зависимости в данных о транспортном потоке с высокой степенью детализации.

1) Адаптивное обучение параметров узлов графа (NAPL, от англ. Node-Adaptive Parameter Learning), где каждый узел соответствует измерительной станции.

Модуль NAPL формирует индивидуальные параметры для каждого узла, благодаря чему модель способна обучаться специфическим паттернам временных рядов, а не только общим закономерностям:

$$\Theta = E_G \cdot W_G, \quad (3)$$

где $E_G \in \mathbb{R}^{N \times d}$ – матрица встраиваний узлов графа, в которой каждая строка является обучаемым вектором признаков для соответствующей измерительной станции; d – размерность встраивания; $W_G \in \mathbb{R}^{d \times C \times F}$ – общий пул весов, содержащий обучаемые матрицы весов слоев GCN и GRU, которые являются общими для всех вершин графа; каждая станция i извлекает из этого пула свой индивидуальный набор параметров на основе своего вектора встраивания; для станции i модуль NAPL извлекает параметры θ_i из пула весов на основе вектора встраивания E_i^G .

Графовая сверточная сеть с расширением NAPL формально определяется следующим образом:

$$Z = \left(I_N + D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} \right) X E_G W_G + E_G b_G, \quad (4)$$

где A и D – матрица смежности и диагональная матрица степеней соответственно.

2) Генерация адаптивных графов по данным (DAGG, аббр. от англ. Data-Adaptive Graph Generation).

Модуль DAGG автоматически обучает матрицу смежности по данным, а не использует заранее заданный граф:

$$\tilde{A} = \text{Softmax}(\text{ReLU}(E_A \cdot E_A^T)), \quad (5)$$

где $E_A \in \mathbb{R}^{N \times d_e}$ – обучаемая матрица встраиваний узлов графа, в которой каждая строка представляет вектор признаков соответствующей станции для генерации графа; Softmax – нормализует матрицу связей; ReLU – обнуляет отрицательные значения.

3) Интеграция NAPL, DAGG and GRU

AGCRN объединяет оба модуля с GRU и одновременно моделирует пространственные и временные зависимости:

$$A_e = \text{softmax}(\text{ReLU}(E E^T)), \quad (6)$$

$$z_t = \sigma(A_e[X_{:,t}, h_{t-1}] E W_z + E b_z), \quad (7)$$

$$r_t = \sigma(A_e[X_{:,t}, h_{t-1}] E W_r + E b_r), \quad (8)$$

$$\hat{h}_t = \tanh(A_e[X_{:,t}, r \odot h_{t-1}] E W_{\hat{h}} + E b_{\hat{h}}), \quad (9)$$

$$h_t = z \odot h_{t-1} + (1 - z) \odot \hat{h}_t. \quad (10)$$

где E – единая матрица встраиваний узлов графа, используемая и в NAPL, и в DAGG: матрица встраиваний – это матрица, в которой каждому объекту ставится в соответствие числовой вектор признаков (встраивание); эти векторы обучаются моделью и представляют объекты в непрерывном векторном пространстве; $W_z, W_r, W_{\hat{h}}, b_z, b_r, b_{\hat{h}}$ – обучаемые параметры; \odot – поэлементное умножение (произведение Адамара).

Благодаря своей структуре AGCRN через модуль NAPL захватывает индивидуальные паттерны узлов, а через модуль DAGG автоматически учит пространственные связи между временными рядами, не требуя заранее заданного графа. В работе [12] показана высокая эффективность AGCRN в задачах прогноза трафика. Это демонстрирует, что AGCRN особенно хорошо подходит для задач прогноза транспортных потоков с неоднородными данными, когда временные ряды из различных источников имеют разные паттерны. Поэтому в данном исследовании модель AGCRN используется как локальная модель обучения на туманных узлах.

В предлагаемой модели туманные узлы разделяются по принципу исполняемых функций:

- обучаемые туманные узлы (TFN, аббр. от англ. Trainable Fog Node) обучают модели на данных от измерительных станций;

- агрегационные туманные узлы (AFN, аббр. от англ. Aggregation Fog Node) выполняют роль узлов-агрегаторов.

Каждый TFN F_n обучает модель AGCRN на локальном наборе данных. Функция потерь для обучения модели имеет следующий вид:

$$L(\theta_n) = \frac{1}{|D_n|} \sum_{(X,y) \in D_n} \|f_{\theta_n}(X) - y\|_2^2, \quad (11)$$

где θ_n – параметры модели AGCRN на туманном узле F_n ; f_{θ_n} – прогнозная функция модели; $\|\cdot\|_2^2$ – квадрат L2-нормы.

Параметры обновляются по градиентному спуску: $\theta_n \leftarrow \theta_n - \eta \nabla_{\theta_n} L(\theta_n)$, где η – шаг обучения.

Процесс обучения модели выполняется независимо на каждом туманном узле. TFN узлы собирают, обрабатывают и обучаются на данных станций внутри своего кластера. Это одновременно защищает приватность данных и уменьшает вычислительную нагрузку на каждый узел.

Формирование альянсов туманных узлов

После кластеризации датчиков с помощью HDBSCAN каждая полученная группа представляется соответствующим туманным узлом, размещенным в меоиде. Цель на этом этапе – организовать туманные узлы в альянсы для поддержки децентрализованного FL. Такая группировка снижает сетевую нагрузку, повышает стабильность системы, сохраняет приватность данных и уменьшает задержку, что соответствует требованиям распределенного интернета вещей [21]. Альянс – это группа туманных узлов, объединенных по географической близости, которые совместно выполняют децентрализованную агрегацию параметров модели в рамках FL. Каждый альянс функционирует автономно и координируется через узел агрегации (AFN).

Теоретической основой служит иерархическая модель FL, в которой туманные узлы объединяются в альянсы и образуют промежуточный слой между локальными датчиками и глобальным облаком. Недавние работы показывают, что такие иерархии позволяют более эффективно использовать сетевые ресурсы: модели сначала агрегируются на промежуточных узлах, а не передаются напрямую в облако. В отличие от слоя датчиков, где неравномерная плотность их распределения в пространстве и неизвестное число кластеров требуют применения методов кластеризации на основе плотности (таких как HDBSCAN), способных работать с шумом и кластерами сложной формы, слой туманных узлов уже «сглажен» и представлен более стабильными географическими репрезентативными точками. Для упрощения предлагается использовать K-means для кластеризации туманных узлов. Этот метод позволяет задать фиксированное число кластеров, минимизирует внутрикластерную дисперсию и легко поддерживает дополнительные ограничения, важные для практической реализации [22].

Число альянсов k определяется задачей развертывания. В данном исследовании рассматриваются значения $k \in \{1, 3, 6\}$, охватывающие диапазон от крупных альянсов с большим числом узлов ($k = 1$) до компактных – с малым числом узлов ($k = 6$).

Для корректной работы алгоритма K-means с географическими данными координаты туманных узлов (широта φ , долгота λ) преобразуются в локальную метрическую систему с помощью равнопромежуточной проекции относительно средней точки $(\bar{\varphi}, \bar{\lambda})$:

$$x_i = R \cdot (\lambda_i - \bar{\lambda}) \cdot \cos \bar{\varphi}, \quad y_i = R \cdot (\varphi_i - \bar{\varphi}), \quad (12)$$

Данная проекция ограничивает искажения на малых и средних широтах и подходит для локальных областей. Матрица попарных расстояний D_{fog} (вычисленная по формуле гаверсинуса) затем используется для оценки внутрикоалиционного радиуса и выбора AFN, обеспечивая географическую точность, а не только евклидову близость.

Ограничения на размер и обработка исключений

Стандартный K-means может создавать несбалансированные или одиночные кластеры, особенно при разреженных географических данных. Это проблематично для децентрализованного FL, так как очень малые альянсы не могут эффективно агрегировать модели. Чтобы снизить этот риск, введем ограничение на минимальный размер ($min_size = 2$ узла на альянс). Такое требование гарантирует, что в каждом альянсе как минимум два участника; это поддерживает внутрисоюзную агрегацию FedAvg, повышает устойчивость и уменьшает влияние шума от данных одного узла [23].

Дополнительно для контроля показателей качества обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service) предлагается последующая проверка радиуса внутри альянса (расстояние от AFN до самого удаленного участника). Если этот радиус превышает порог R_{ma} , система помечает нарушение для последующей корректировки k или переразбиения альянсов, что соответствует ресурсно-ориентированным моделям в туманном узле.

Выбор AFN через минимаксный центр альянса

Внутри каждого альянса мы выбираем два ключевых узла: i – основной AFN, определяемый как минимаксный центр альянса в географическом пространстве; ii – резервный AFN, определяемый как следующий по критерию минимаксного центра.

Формально,

$$\text{Primary AFN}(A) = \operatorname{argmin}_{j \in A} \max_{i \in A} D_{fog}(i, j), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Backup AFN}(A) = \\ = \operatorname{argmin}_{j \in A \setminus \{\text{Primary AFN}\}} \max_{i \in A} D_{fog}(i, j). \end{aligned} \quad (14)$$

Предложенный подход реализует принцип минимакса: выбирается узел, минимизирующий максимальное расстояние до любого участника альянса, тогда как классический метод k -медоидов минимизирует сумму расстояний. Это повышает устойчивость к шуму и географическим выбросам – типичной проблеме распределенных туманных сетей. В отличие от центроида K -means, минимаксный центр всегда соответствует реально существующему туманному узлу, что упрощает развертывание и уменьшает внутриальянсовый радиус, снижая затраты на связь и задержки при агрегации. Помимо этого, механизм резервного AFN повышает отказоустойчивость системы: при отказе основного узла его функции автоматически принимает резервный.

Механизм отказоустойчивости при потере связи с узлом AFN

В данной работе предлагается облегченный алгоритм переключения на резервный узел (построен на принципах отказоустойчивых распределенных систем, аналогичных протоколу [24], но упрощен для среды туманных вычислений малого масштаба). Алгоритм автоматически запускается на узлах-участниках туманных вычислений внутри альянса и обеспечивает непрерывность работы без поддержки глобального облака. Механизм рассчитан на отказ отдельного узла и предполагает связность сети внутри альянса. Сценарий сетевого разделения, требующий механизма кворума, выходит за рамки данной работы и рассматривается как направление дальнейших исследований.

Алгоритм переключения AFN

```

INPUT:
  ALLIANCES, AFN_MAP
  TIMEOUT      # response deadline for the PRIMARY
PROCEDURE RUN_FAILOVER_PROTOCOL(ALLIANCES, AFN_MAP,
TIMEOUT):
  At each node in an alliance A:
    Periodic LOOP:
      PRIMARY, BACKUP ← AFN_MAP[A]
      IF self ≠ PRIMARY:
        send HEARTBEAT to PRIMARY, wait for ACK up to
TIMEOUT
        IF no ACK received:
          send CHECK_PRIMARY to BACKUP
        IF self == PRIMARY:
          reply to all received HEARTBEAT messages with
ACK
        IF self == BACKUP:
          upon receiving CHECK_PRIMARY:
            send a HEARTBEAT to PRIMARY, wait for ACK up
to TIMEOUT
        IF still no ACK:
          # Promote backup → primary
          PRIMARY ← self
          # Select new BACKUP via "next-best minimax"
in A \ {PRIMARY}
          BACKUP ← NEXT_BEST_MINIMAX(A, D_fog, ex-
clude=PRIMARY)
          AFN_MAP[A] ← (PRIMARY, BACKUP)
          broadcast BROADCAST to all nodes in A to
update AFN_MAP

```

В предлагаемых распределенной структуре и методе узлы AFN не обучают модели на данных, а выступают координаторами альянса. В каждом раунде обучения участники выполняют локальные обновления на своих данных и затем отправляют обученные параметры модели в AFN. AFN агрегирует эти параметры (взвешенным усреднением, аналогично FedAvg) и рассылает агрегированную модель всем туманным узлам в альянсе. Поскольку AFN выполняет только агрегацию, его ресурсы не перегружаются.

Агрегированная модель аккумулирует коллективные знания участников альянса, тогда как каждый туманный узел независимо сохраняет локальные параметры – в частности, регион-специфические векторы встраивания. Внутрикоалиционные соединения в предложенной архитектуре намеренно минимизированы: это сокращает задержки по сравнению с централизованными схемами и, одновременно, распределенная региональная структура обеспечивает дополнительную отказоустойчивость. Таким образом, механизм формирования альянсов и выбора AFN образует эффективный уровень децентрализованной координации, при котором достигается точность обучения и рациональное использование ресурсов без привлечения центрального сервера.

Децентрализованная агрегация модели

Параметры модели делятся на два типа:

- глобальные (матрицы весов GCN-GRU W_z, W_r, W и параметры входных / выходных линейных слоев);
- локальные (векторы встраивания узлов E_n для измерительных станций в кластерах).

Как отмечалось в предыдущем разделе, в предлагаемой архитектуре каждый TFN F_n передает свои параметры модели θ_n узлу AFN внутри альянса. Этот процесс должен использовать защищенный протокол, который сохраняет приватность исходных данных. Протокол обмена параметрами может реализовываться с использованием сквозного шифрования, цифровых подписей и механизмов аутентификации, что обеспечивает конфиденциальность и целостность передаваемых параметров (в рамках данной работы не рассматривается этот аспект более подробно).

Узел AFN $F_{agg,i}$ в альянсе B_i получает параметры от туманных узлов и вычисляет агрегированные параметры:

$$\theta_{agg,i} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{F_n \in B_i} \theta_n. \quad (15)$$

Однако агрегация выполняется с учетом разделения параметров:

– для глобальных параметров:

$$\theta_{agg,i}^{global} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{F_n \in B_i} \theta_n^{global}; \quad (16)$$

– для векторов встраивания узлов: локальные векторы встраивания остаются на туманных узлах, обмен ими между туманными узлами в альянсе не выполняется; такая стратегия обеспечивает обмен общими знаниями (глобальные параметры) между туманными узлами и одновременно сохраняет специфические знания (векторы встраивания узлов) для каждого кластера измерительных станций; это важное нововведение предлагаемого метода, которое позволяет сбалансировать универсальность и локальную адаптацию модели.

Распространение и использование параметров

AFN $F_{agg,i}$ распределяет агрегированные параметры $\theta_{agg,i}$ между всеми туманными узлами альянса B_i . Распределение реализуется посредством однорангового протокола обмена данными: узел AFN адресно передает обновленные параметры каждому TFN внутри коалиции – либо напрямую по протоколу TCP / UDP, либо с применением механизма gossip, при котором каждый узел, получив обновление, ретранслирует его соседним участникам. Подобная схема полностью исключает участие центрального сервера в процессе распределения параметров. Помимо этого, узел AFN сохраняет агрегированные параметры $\theta_n \leftarrow \theta_{agg,i}$ для их последующего использования в собственной локальной модели.

Каждый туманный узел $F_n \in B_i$ обновляет свою модель агрегированными параметрами: $\theta_n \leftarrow \theta_{agg,i}$. Данный механизм обеспечивает включение знаний, накопленных в рамках альянса (посредством

глобальных параметров), в локальную модель каждого узла, сохраняя при этом ее способность адаптироваться к специфике конкретной географической области.

Моделирование и оценка

Верификация предложенной структуры проводится на общедоступных наборах данных PeMSD4 и PeMSD7(M), включающих измерения скорости транспортных потоков с 207 и 228 датчиков соответственно. Сырые данные предварительно обрабатываются перед обучением. Каждый обучающий пример представляет собой последовательность из 12 шагов с интервалом 5 минут, что соответствует одному часу наблюдений.

Модель прогнозирует следующие 12 шагов (на 60 мин. вперед). Для оценки точности краткосрочного и среднесрочного прогноза используются ключевые горизонты 5, 15 и 30 мин. (соответственно 1, 3 и 6 шагов). В данной работе предлагаемое решение сравнивается с двумя базовыми моделями: AGCRN – исходной моделью, обучаемой на одном сервере с полным набором данных (верхняя граница качества прогноза), и FL-AGCRN – федеративным вариантом AGCRN, в котором клиенты координируются через центральный сервер по схеме FedAvg.

Для оценки точности прогноза используются три стандартные метрики: средняя абсолютная ошибка (MAE, аббр. от англ. Mean Absolute Error), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE, аббр. от англ. Root Mean Square Error), симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (sMAPE, аббр. от англ. Symmetric Mean Absolute Percentage Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (18)$$

$$sMAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2}. \quad (19)$$

где y_i – фактическое значение; \hat{y}_i – прогнозное значение; n – число прогнозируемых примеров.

Результаты анализируются и оцениваются для трех ключевых горизонтов: 5, 15 и 30 мин., которые выбраны как контрольные точки в рамках общего 60-минутного окна прогноза (12 шагов по 5 мин.) и соответствуют краткосрочному, среднесрочному и более длительному прогнозу соответственно. Анализ по нескольким горизонтам дает целостное представление о возможностях модели на различных временных масштабах. Для оценки скорости сходимости отслеживается функция потерь после каждого раунда в течение 100 раундов.

Высокая скорость сходимости показывает эффективность обучения модели и существенно влияет на совокупную эффективность при практическом развертывании системы.

Для количественной оценки скорости сходимости используются следующие показатели:

– скорость уменьшения потерь:

$$CR = \frac{L_1 - L_T}{L_1},$$

где L_1, L_T – значения функции потерь в первом и последнем раунде соответственно;

– число раундов до достижения порога:

$$R_{threshold} = \min\{r \mid L_r \leq L_{threshold}\},$$

где $L_{threshold}$ – заданный порог потерь;

– средний наклон сходимости:

$$S_{avg} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} \frac{L_t - L_{t+1}}{L_t},$$

который измеряет среднюю относительную скорость уменьшения потерь по раундам.

В рамках предложенной структуры общие сетевые ресурсы складываются из трех составляющих: ресурсов для сбора данных, ресурсов децентрализованного FL и внутриальянсовых служебных ресурсов. Ресурсы для сбора данных определяются объемом информации, передаваемой от измери-

тельных станций (датчиков) к обучаемым туманным узлам внутри каждого кластера. Ресурсы децентрализованного FL связаны с обменом параметрами модели между TFN и AFN. Внутриальянсовые служебные ресурсы обеспечивают координацию работы альянса, включая механизм контроля доступности узлов, переключение на резервный AFN и рассылку обновленных параметров участникам альянса. Следует отметить, что ресурсы децентрализованного FL и внутриальянсовые служебные ресурсы не пересекаются: первые отвечают исключительно за обмен параметрами модели в рамках FL, а вторые – за поддержание работоспособности и координацию узлов.

Расчет ресурсов для FL-AGCRN производится по выражению (20), где s_{data} – размер одной записи датчика (байт); r – число записей; $d_{i,client}$ – расстояние от датчика i до клиента; s_{model} – размер модели (байт); $s_{updates}$ – размер обновлений параметров (байт); $n_{clients}$ – число клиентов; R – число раундов обучения; $d_{client,server}$ – расстояние от клиента до сервера.

Расчет ресурсов для DFL-FC-AGCRN производится по выражению (23), где A – число альянсов; n_j – число узлов в альянсе j ; $d_{i,fog}$ – расстояние от датчика i до туманного узла; d_j – среднее расстояние внутри альянса j .

где $C_{FL-AGCRN} = C_{sensor} + C_{params}$, (20)

$$C_{sensor} = \sum_{i=1}^n (s_{data} \cdot r \cdot d_{i,client}), \quad (21)$$

$$C_{params} = (s_{model} \cdot n_{clients} \cdot d_{client,server} + s_{updates} \cdot n_{clients} \cdot d_{client,server}) \cdot R. \quad (22)$$

где $C_{DFL-FC-AGCRN} = C_{sensor} + C_{alliance}$, (23)

$$C_{sensor} = \sum_{i=1}^n (s_{data} \cdot r \cdot d_{i,fog}), \quad (24)$$

$$C_{alliance} = \sum_{j=1}^A (s_{updates} \cdot n_j \cdot d_j + s_{model} \cdot n_j \cdot d_j) \cdot R. \quad (25)$$

Построение топологии сети

В среде туманных вычислений качество прогноза зависит не только от алгоритма обучения, но и от топологии сети. Построение последней состоит из двух шагов.

Шаг 1. Формирование возможных топологий «датчики → туманные узлы» с помощью алгоритма HDBSCAN, основываясь на географических координатах датчиков.

Шаг 2. Анализ влияния числа альянсов туманных узлов на точность и ресурсозатратность модели FL для задачи прогнозирования трафика.

Кластеризация датчиков

Цель первого этапа – подобрать гиперпараметры HDBSCAN так, чтобы преобразовать географически распределенные датчики в слой туманных узлов с компактной топологией. Для этого выполняется перебор по сетке значений параметров HDBSCAN, где входом служит заранее вычисленная матрица геодезических расстояний между датчиками D_{sensor} .

Для практического развертывания важен допустимый радиус связи датчиков. В качестве базовой технологии беспроводного доступа рассматривается Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah), который поддержи-

вает подключение до 8192 устройств к одной точке доступа и обеспечивает теоретическое покрытие на расстоянии до ≈ 1 км. Согласно модели, предложенной в [25], достижимый радиус связи может составлять около 1,5 км при использовании схемы модуляции и кодирования MCS10. На основе полученного результата в настоящей работе принимается радиус связи датчика, равный 1,5 км. На основе этого порога отбрасываем конфигурации, где макрорадиус превышает предел, и выбираем три представительных варианта (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты кластеризации датчиков

TABLE 2. Results of Sensor Clustering Optimisation

mcs	mins	alpha	Sil	r_{max} , км	Sensor, %	K
2	1	0,5	0,70	0,31	3,86	79
3	2	0,7	0,52	0,93	10,94	33
5	2	0,5	0,53	1,47	15,77	18

Усл. обозначения: Sil – коэффициент силуэта; r_{max} – максимальный радиус кластера; Sensor – доля нераспределенных датчиков

Чтобы ни один датчик не был отброшен, дополнительно рассматриваем вариант переназначения шума в ближайший кластер по медуиду. В таблице 2 показаны показатели до переназначения, чтобы честно отразить качество HDBSCAN. Большое число туманных узлов приводит к высоким затратам ресурсов на развертывание систем и межальянсовые коммуникации. Для минимизации стоимости при сохранении простоты выбираем конфигурацию с 18 туманными узлами.

Оптимизация формирования альянсов

На втором этапе, опираясь на топологию из 18 туманных узлов, подбираем число альянсов. Требуется учитывать естественную географическую структуру туманных узлов, строго соблюдать ограничение на радиус связи внутри альянса (от AFN до участников). Радиус взаимодействия внутри альянса задается равным 10 км, что соответствует концепции сетей 6G, в рамках которой вычислительные функции и ресурсы распределяются по иерархии от облачного уровня к уровню туманных и периферийных вычислений. При таком подходе альянс туманных узлов, охватывающий территорию протяженностью в десятки километров, рассматривается как единый регион периферийных вычислений с согласованным управлением и

координацией ресурсов. Это согласуется с моделью динамических туманных вычислений, в которой туманные устройства образуют вычислительный кластер с возможностью горизонтального масштабирования, на базе которого могут быть развернуты платформы и услуги.

Рассматриваются значения $k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, охватывающие диапазон от полностью централизованной агрегации до высокодецентрализованной конфигурации. Следует подчеркнуть, что данный этап относится к инфраструктурному проектированию сети, а не является основным предметом исследования: его цель – зафиксировать топологию развертывания до начала основных экспериментов. Для обеспечения статистической надежности каждая конфигурация запускается 3 раза с различными инициализациями весов модели (seeds: 42, 123, 777) при 10 раундах и 3 локальных эпохах на раунд – итого 18 независимых прогонов. Результаты представлены как среднее \pm стандартное отклонение (выборочное, $n = 3$). Топология альянсов фиксируется через K -means по географическим координатам туманных узлов (seed = 42) и не изменяется между прогонами.

Результаты 18 независимых прогонов выявляют устойчивую U -образную зависимость метрик точности от числа альянсов k : при малых значениях ($k = 1$) высокая неоднородность данных внутри единственного альянса ухудшает агрегацию; при больших ($k \geq 4$) чрезмерная фрагментация вызывает локальное переобучение – функция потерь монотонно снижается ($0,330 \rightarrow 0,238$), тогда как MAE и RMSE на тестовой выборке деградируют. Количественные результаты оценки качества модели, функции потерь и коммуникационных затрат при различных значениях k представлены в таблице 3.

Оптимум достигается при $k \in \{2, 3\}$, где масштаб альянса соответствует естественному транспортному коридору. Стандартное отклонение MAE дополнительно подтверждает нестабильность крайних конфигураций ($k = 1$: $\sigma = 0,549$; $k = 6$: $\sigma = 0,391$) по сравнению со средними ($k = 3$: $\sigma = 0,245$). С учетом точности, устойчивости и коммуникационных затрат конфигурация $k = 3$ обеспечивает наилучший баланс и принимается как оптимальная.

ТАБЛИЦА 3. Оценка при разном числе альянсов

TABLE 3. Performance with Varying Number of Alliances

k	MAE	RMSE	sMAPE	Loss	Коммуникационные затраты, Мб
1	10,428 \pm 0,549	18,192 \pm 0,599	0,158 \pm 0,003	0,330 \pm 0,001	343,28
2	9,814 \pm 0,157	17,342 \pm 0,089	0,153 \pm 0,002	0,313 \pm 0,000	221,40
3	9,869 \pm 0,245	17,477 \pm 0,157	0,151 \pm 0,002	0,292 \pm 0,001	178,61
4	9,958 \pm 0,309	17,693 \pm 0,263	0,154 \pm 0,003	0,262 \pm 0,000	135,20
5	9,969 \pm 0,187	17,713 \pm 0,161	0,152 \pm 0,003	0,262 \pm 0,000	132,67
6	10,170 \pm 0,391	17,997 \pm 0,351	0,154 \pm 0,009	0,238 \pm 0,000	118,59

Сравнительная оценка качества моделей

При радиусе связи $R = 10$ км система содержит 18 туманных узлов, которые обслуживают 207 датчиков и разбиваются на 3 независимых тренировочных альянса. Развертывание системы на датасете PeMSD4 показано на рисунке 2.

Результаты прогноза интенсивности трафика для трех моделей суммированы на рисунке 3. Для горизонтов 5, 15 и 30 мин. после 100 раундов обучения приводятся MAE, RMSE и sMAPE. Централизованная модель достигает наилучшей точности и показывает минимальные значения MAE. Это ожидаемо, так как обучение проводится на полном наборе данных без ограничений. Две другие модели, FL-AGCRN и DFL-FC-AGCRN, демонстрируют более слабые результаты, но сохраняют конкурентоспособную точность.

У всех трех моделей качество прогноза ухудшается при увеличении горизонта прогнозирования, что соответствует общему поведению задач прогнозирования временных рядов. Скорость деградации для DFL-FC-AGCRN сопоставима со скоростью для FL-AGCRN. Это показывает, что характеристики прогноза на больших горизонтах хорошо сохраняются в иерархической децентрализованной архитектуре.

В рамках данного исследования были выбраны 4 случайных датчика внутри сформированных кластеров, где были полученные примеры прогнозов. Результаты прогноза модели DFL-FC-AGCRN на реальном датасете для горизонтов 5, 15 и 30 мин. показаны на рисунке 4. Чтобы дополнительно продемонстрировать эффективность предлагаемой структуры и методы, была оценена скорость сходимости модели, а также необходимые затрачиваемые сетевые ресурсы. Результаты для 10, 20, 50 и 100 раундов обучения суммированы в таблице 4.

Анализ результатов показывает, что предложенная модель демонстрирует не только ускоренную сходимость, но и поддерживает высокую результативность процесса обучения на всем протяжении эксперимента. Для оценки влияния ускоренной

сходимости на объем сетевых взаимодействий были дополнительно рассчитаны коммуникационные затраты, результаты которых представлены в таблице 5. Работоспособность модели при развертывании подтверждается также результатами, представленными на рисунках 5 и 7. Полученные данные однозначно подтверждают практическую применимость и перспективность разработанного подхода.

ТАБЛИЦА 4. Показатели скорости сходимости

TABLE 4. Convergence Rate Indicators

Метрика	FL-AGCRN	DFL-FC-AGCRN	Преимущество DFL-FC-AGCRN, %
Коэффициент снижения потерь после 10 раундов, %	5,79	4,76	17,8
Коэффициент снижения потерь после 20 раундов, %	7,16	6,08	15,1
Коэффициент снижения потерь после 50 раундов, %	8,51	7,45	12,5
Коэффициент снижения потерь после 100 раундов, %	9,26	8,28	10,6
Раунды для достижения потерь 0,325 (FL) / 0,290	18 раундов	13 раундов	27,8
Раунды для достижения потерь 0,320 (FL) / 0,285	43 раунда	33 раунда	23,3

ТАБЛИЦА 5. Влияние скорости сходимости на затраты на связь

TABLE 5. Impact of Convergence Speed on Communication Cost

Метрика	FL-AGCRN	DFL-FC-AGCRN	Экономия, %
Стоимость связи за раунд	34,33 МБ	17,86 МБ	48,0
Затраты до достижения Loss 0,325 (FL) / 0,290 (DFL)	617,94 МБ (18 раундов)	232,18 МБ (13 раундов)	62,4
Затраты до достижения Loss 0,320 (FL) / 0,285 (DFL)	1476,19 МБ (43 раунда)	589,38 МБ (33 раунда)	60,1
Суммарные затраты за 100 раундов	3433,00 МБ	1786,10 МБ	48,0

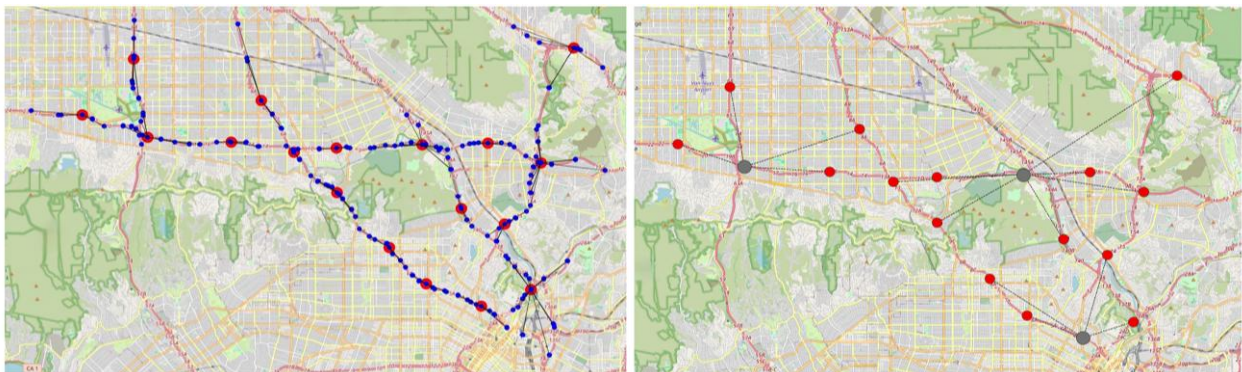


Рис. 2. Развертывание системы на датасете PeMSD4

Fig. 2. Deployment of the System on the PeMSD4 Dataset

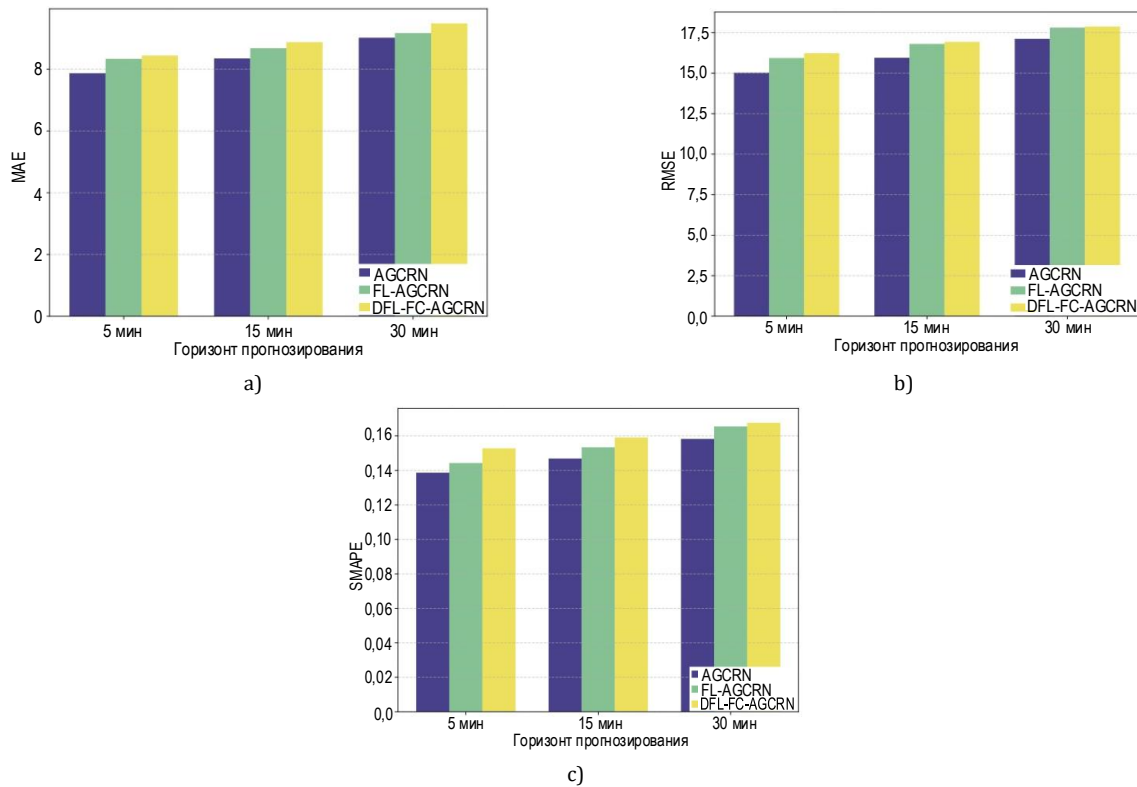


Рис. 3. Точность моделей на датасете PeMSD4: а) MAE; б) RMSE; в) SMAPE
 Fig. 3. Accuracy of Models on the PeMSD4 Dataset: a) MAE; b) RMSE; c) SMAPE

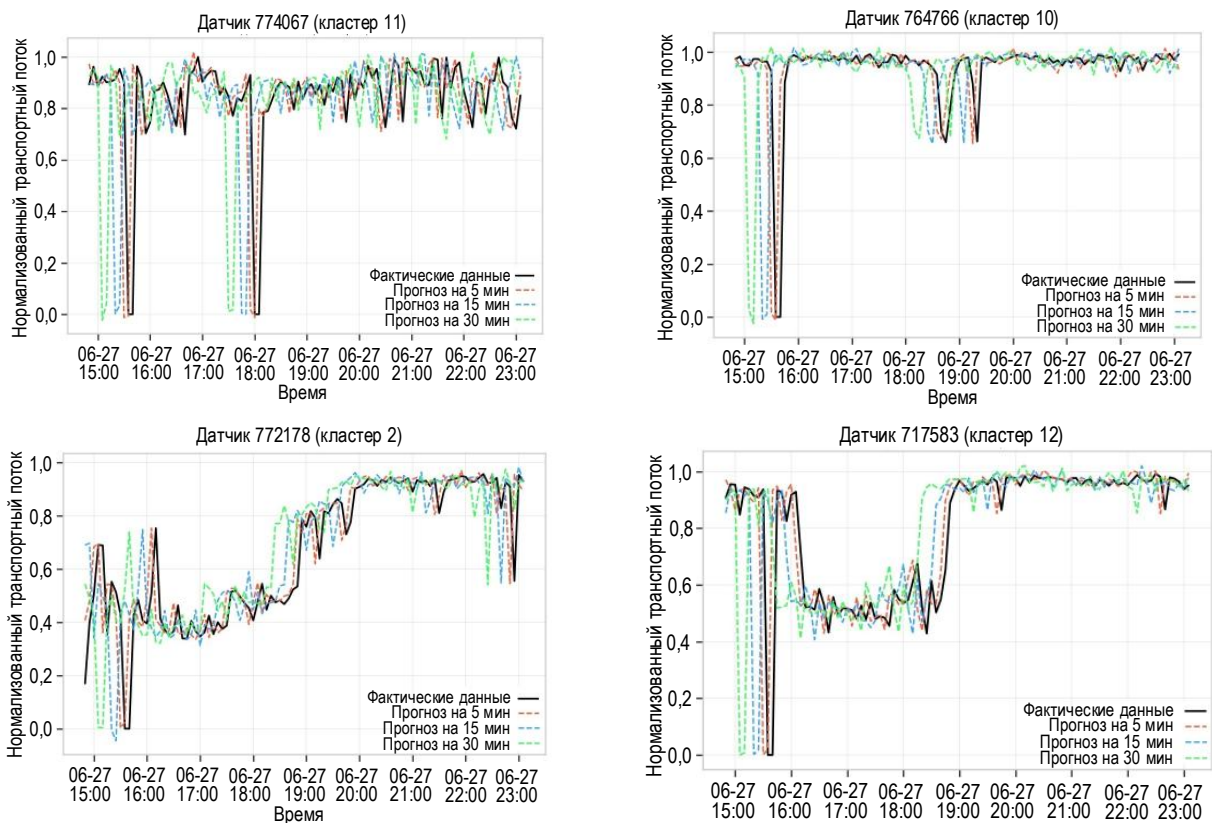


Рис. 4. Результаты прогноза модели DFL-FC-AGCRN для четырех случайно выбранных датчиков в кластерах
 Fig. 4. DFL-FC-AGCRN Model Forecast Results for Four Randomly Selected Sensors in Clusters

Оценка на расширенном датасете

Для проверки применимости предложенной модели были проведены дополнительные эксперименты на наборе данных PeMSD7(M). Это реальный транспортный набор данных из системы измерения производительности Caltrans (Performance Measurement System, Округ 7). Он содержит измерения скорости транспортных потоков с 228 датчиков (станций) на автомагистралях с временным шагом 5 мин. за определенные периоды (обычно один месяц или квартал). По сравнению с другими наборами PeMS, такими как PeMSD4 или PeMSD8, этот датасет содержит больше датчиков и позволяет оценить

способность модели работать с более распределенными и сложными данными.

Было выполнено исследование для выбора оптимального числа кластеров и альянсов туманных вычислений, при этом учитывались следующие критерии: возможность практического развертывания с учетом ограничений на радиус связи датчиков ($\leq 1,5$ км) и радиус взаимодействия внутри альянса (≤ 10 км), минимизация необходимых сетевых взаимодействий и точность прогноза модели. В итоге 228 датчиков организуются в 38 узлов и далее разбиваются на 3 альянса (это показано на рисунке 5).

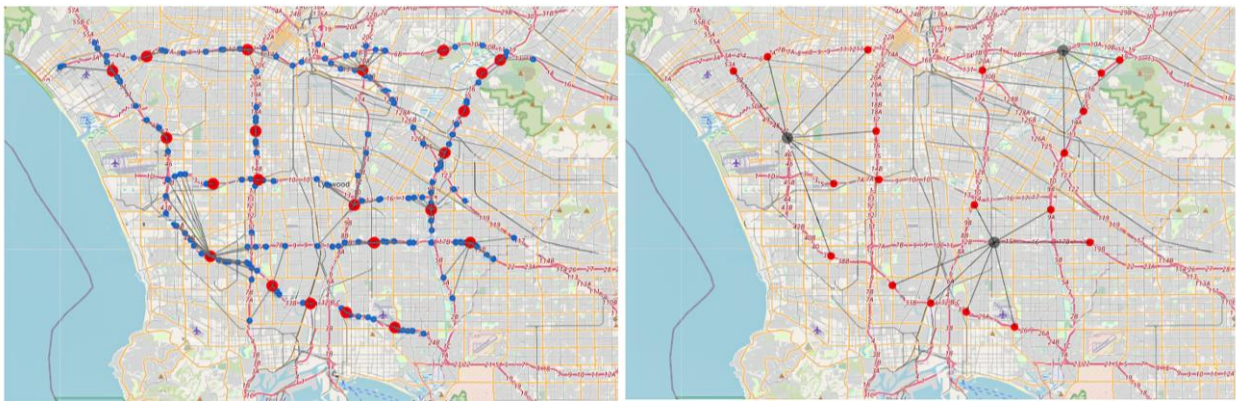


Рис. 5. Развертывание системы на наборе данных PeMSD7(M)

Fig. 5. Deployment of the System on the PeMSD7(M) Dataset

Для 50 раундов обучения с 3 локальными эпохами предлагаемая структура сохраняет эффективность, демонстрируя достаточную точность и при этом уменьшая необходимые сетевые взаимодействия благодаря иерархической структуре и предложенному механизму альянсов. Результаты показаны на рисунках 6 и 7. Сводные значения коммуникационных затрат на различных этапах обучения приведены в таблице 6. Средняя экономия сетевого взаимодействия составляет около 48% после 50 раундов.

ТАБЛИЦА 6. Затраты на связь на этапах реализации проекта

TABLE 6. Communication Cost at Milestones

Количество раундов	FL-AGCRN	DFL-FC-AGCRN	Экономия	
			МБ	%
10	343,30	178,60	164,70	48,0
20	686,60	357,20	329,40	48,0
50	1716,50	893,00	823,50	48,0
100	3433,00	178,10	1646,90	48,0

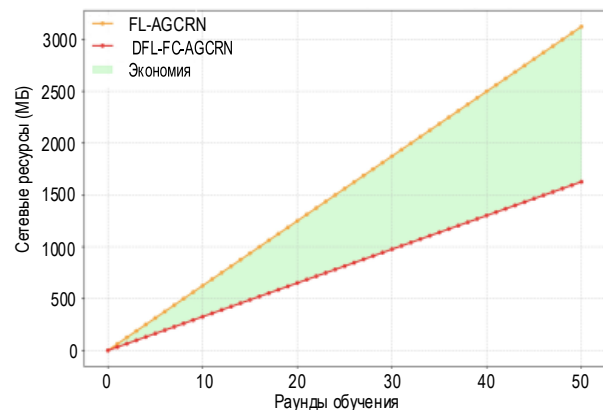


Рис. 6. Коммуникационные затраты нарастающим итогом

Fig. 6. Cumulative Communication Costs

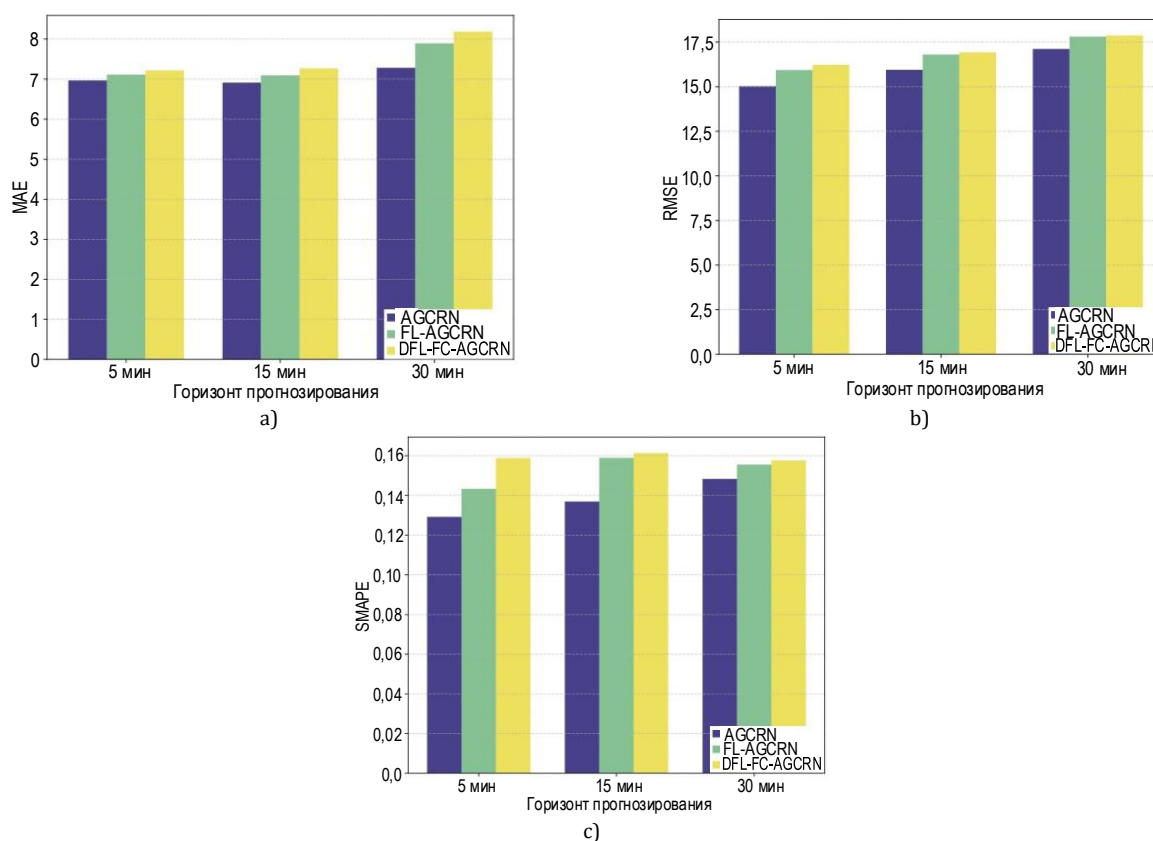


Рис. 7. Точность моделей на датасете PeMSD7(M): а) MAE; б) RMSE; в) SMAPE

Fig. 7. Accuracy of Models on the PeMSD7(M) Dataset: a) MAE; b) RMSE; c) SMAPE

Заключение

В данной работе представлена новая структура на основе альянсов, объединяющая туманные вычисления и децентрализованное FL для задачи прогнозирования трафика в распределенных средах умного города. Объединяя три современные технологии – децентрализованное FL, туманные вычисления и AGCRN, предлагается подход, который позволяет найти компромисс между точностью прогноза распределенной модели искусственного интеллекта, эффективностью использования сетевых ресурсов. При этом децентрализованный характер естественным образом обеспечивает устойчивость системы. Эксперименты на открытых реальных данных из системы Caltrans Performance Measurement System подтверждают осуществимость и эффективность метода. Следует отметить, что небольшое снижение точности модели при значительной экономии сетевого трафика и повышении отказоустойчивости является

допустимым компромиссом для практических приложений, работающих с большими объемами данных.

В целом предложенные структура и метод представляют собой важный шаг к созданию децентрализованных систем прогнозирования транспортных потоков, пригодных для внедрения в инфраструктуру умных городов. Такие системы могут также стать частью инфраструктуры сетевых городских пространств. Предложенный подход повышает не только качество прогнозирования, но и устойчивость и масштабируемость ИТС. С практической точки зрения данную структуру можно интегрировать в различные компоненты ИТС: прогнозирование скорости, потока трафика и другие задачи. Гибкость решения позволяет адаптировать его к различным сценариям, что открывает новые направления исследований в области распределенного прогнозирования транспортных потоков.

Список источников

1. Jiang W., Luo J. Graph neural network for traffic forecasting: A survey // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 207. P. 117921. DOI:10.1016/j.eswa.2022.117921. EDN:MOJUQL
2. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things Journal. 2012. Vol. 1. Iss. 1. PP. 22–32. DOI:10.1109/JIOT.2014.2306328
3. Caterini A.L., Chang D.E. Recurrent Neural Networks // In: Deep Neural Networks in a Mathematical Framework. SpringerBriefs in Computer Science. Cham: Springer, 2018. PP. 59–79. DOI:10.1007/978-3-319-75304-1_5

4. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. 2025. DOI:10.1201/9788770046749
5. Qi T., Chen L., Li G., Li Y., Wang C. FedAGCN: A traffic flow prediction framework based on federated learning and Asynchronous Graph Convolutional Network // *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 138. P. 110175. DOI:10.1016/j.asoc.2023.110175. EDN:XAIBCN
6. Yuan X., Chen J., Yang J., Zhang N., Yang T., Han T. FedSTN: Graph Representation Driven Federated Learning for Edge Computing Enabled Urban Traffic Flow Prediction // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 24. Iss. 8. PP. 8738–8748. DOI:10.1109/TITS.2022.3157056. EDN:YKQIZO
7. Zhao L., Song Y., Zhang C., Liu Y., Wang P., Lin T. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. Vol. 21. Iss. 9. PP. 3848–3858. DOI:10.1109/TITS.2019.2935152.
8. Zhang C., Zhang S., Yu J.J.Q., Yu S. FASTGNN: A Topological Information Protected Federated Learning Approach for Traffic Speed Forecasting // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17. Iss. 12. PP. 8464–8474. DOI:10.1109/TII.2021.3055283
9. Feng Z., Zha H., Xu C., He Y., Lin Y. FCGCN: Feature Correlation Graph Convolution Network for Few-Shot Individual Identification // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2024. Vol. 70. Iss. 1. PP. 2848–2860. DOI:10.1109/TCE.2023.3322224
10. McMahan B., Moore E., Ramage D., Hampson S., A. y Arcas B. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data // *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (PMLR)*. 2017. Vol. 54. PP. 1273–1282. URL: <https://proceedings.mlr.press/v54/mcmahan17a.html> (Accessed 29.09.2025)
11. Giannakis G.B., Ling Q., Mateos G., Schizas I.D., Zhu H. Decentralized Learning for Wireless Communications and Networking // In: Glowinski R., Osher S.J., Yin W. (eds.) *Splitting Methods in Communication, Imaging, Science, and Engineering*. Scientific Computation. Cham: Springer, 2016. PP. 461–497. DOI:10.1007/978-3-319-41589-5_14
12. Bai L., Yao L., Li C., Wang X., Wang C. Adaptive Graph Convolutional Recurrent Network for Traffic Forecasting // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. PP. 17804–17815.
13. Liu Y., Yu J.J.Q., Kang J., Niyato D., Zhang S. Privacy-Preserving Traffic Flow Prediction: A Federated Learning Approach // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. Iss. 8. PP. 7751–7763. DOI:10.1109/JIOT.2020.2991401. EDN:MKJWWJ
14. Yu B., Yin H., Zhu Z. Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks: A Deep Learning Framework for Traffic Forecasting // *arXiv:1709.04875v4*. 2018. DOI:10.24963/ijcai.2018/505
15. Liu Y., Yu J.J.Q., Kang J., Niyato D., Zhang S. Privacy-Preserving Traffic Flow Prediction: A Federated Learning Approach // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. Iss. 8. PP. 7751–7763. DOI:10.1109/JIOT.2020.2991401
16. Zhang H., Jiang S., Xuan S. Decentralized federated learning based on blockchain: concepts, framework, and challenges // *Computer Communications*. 2024. Vol. 216. PP. 140–150. DOI:10.1016/j.comcom.2023.12.042. EDN:NYTCWY
17. Lian X., Zhang C., Zhang H., Hsieh C.-J., Zhang W., Liu J. Can Decentralized Algorithms Outperform Centralized Algorithms? A Case Study for Decentralized Parallel Stochastic Gradient Descent // *arXiv:1705.09056v5*. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1705.09056
18. Turazza F., Pietri M., Picone M., Mamei M. FedBGS: A Blockchain Approach to Segment Gossip Learning in Decentralized Systems // *Proceedings of the 45th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW, Glasgow, United Kingdom, 21–23 July 2025)*. IEEE, 2025. PP. 760–770. DOI:10.1109/ICDCSW63273.2025.00136
19. Yu E., Dong D., Xu Y., Ouyang S., Liao X. CD-SGD: Distributed Stochastic Gradient Descent with Compression and Delay Compensation // *arXiv:2106.10796v2*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2106.10796
20. Stewart G., Al-Khassaweneh M. An Implementation of the HDBSCAN* Clustering Algorithm // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 2405. DOI:10.3390/app12052405
21. Chen C., Petty K., Skabardonis A. Freeway Performance Measurement System: Mining Loop Detector Data // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2001. Vol. 1748. Iss. 1. DOI:10.3141/1748-12
22. Sharma M., Jaggi P. Reliable federated learning in a cloud-fog-IoT environment // *The Journal of Supercomputing*. 2023. Vol. 79. PP. 15435–15458. DOI:10.1007/s11227-023-05252-w. EDN:EETJGC
23. Manju B., Kumar C.S.P., Jegan J., Jagadeeshan D., Nunna S.K. Hierarchical Federated Learning with Fog Nodes: Enhancing Efficiency in Smart City Networks // *Proceedings of the International Conference on Information Technology (OCIT, Vijayawada, India, 12–14 December 2024)*. IEEE, 2024. PP. 749–753. DOI:10.1109/OCIT65031.2024.00135
24. Lähderanta T., Lovén L., Ruha L., Leppänen T., Launonen I., Riekkilä J., et al. Capacitated spatial clustering with multiple constraints and attributes // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 127. Part A. P. 107182. DOI:10.1016/j.engappai.2023.107182. EDN:CXFPOY
25. Hu J., Liu K. Raft consensus mechanism and the applications // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1544. Iss. 1. P. 012079. DOI:10.1088/1742-6596/1544/1/012079. EDN:IJJLUI
26. Performance evaluation of IEEE 802.11ah systems // *Proceedings of the 24th Telecommunications Forum (TELFOR, Belgrade, Serbia, 22–23 November 2016)*. IEEE, 2016. DOI:10.1109/TELFOR.2016.7818748

References

1. Jiang W., Luo J. Graph neural network for traffic forecasting: A survey. *Expert Systems with Applications*. 2022;207: 117921. DOI:10.1016/j.eswa.2022.117921. EDN:MOJUQL
2. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2012;1(1):22–32. DOI:10.1109/JIOT.2014.2306328
3. Caterini A.L., Chang D.E. Recurrent Neural Networks. In: *Deep Neural Networks in a Mathematical Framework*. Springer-Briefs in Computer Science. Cham: Springer; 2018. p.59–79. DOI:10.1007/978-3-319-75304-1_5
4. Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. *Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks*. 2025. DOI:10.1201/9788770046749
5. Qi T., Chen L., Li G., Li Y., Wang C. FedAGCN: A traffic flow prediction framework based on federated learning and Asynchronous Graph Convolutional Network. *Applied Soft Computing*. 2023;138:110175. DOI:10.1016/j.asoc.2023.110175. EDN:XAIBCN


6. Yuan X., Chen J., Yang J., Zhang N., Yang T., Han T. FedSTN: Graph Representation Driven Federated Learning for Edge Computing Enabled Urban Traffic Flow Prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023;24(8): 8738–8748. DOI:10.1109/TITS.2022.3157056. EDN:YKQIZO
7. Zhao L., Song Y., Zhang C., Liu Y., Wang P., Lin T. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020;21(9):3848–3858. DOI:10.1109/TITS.2019.2935152. EDN:EDVHGA
8. Zhang C. Zhang S., Yu J.J.Q., Yu S. FASTGNN: A Topological Information Protected Federated Learning Approach for Traffic Speed Forecasting. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(12):8464–8474. DOI:10.1109/TII.2021.3055283
9. Feng Z., Zha H., Xu C., He Y., Lin Y. FCGCN: Feature Correlation Graph Convolution Network for Few-Shot Individual Identification. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2024;70(1):2848–2860. DOI:10.1109/TCE.2023.3322224
10. McMahan B., Moore E., Ramage D., Hampson S., A. y Arcas B. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data. *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, PMLR, vol.54*. 2017. p.1273–1282. URL: <https://proceedings.mlr.press/v54/mcmahan17a.html> [Accessed 29.09.2025]
11. Giannakis G.B., Ling Q., Mateos G., Schizas I.D., Zhu H. Decentralized Learning for Wireless Communications and Networking. In: *Glowinski R., Osher S.J., Yin W. (eds.) Splitting Methods in Communication, Imaging, Science, and Engineering. Scientific Computation*. Cham: Springer; 2016. p.461–497. DOI:10.1007/978-3-319-41589-5_14
12. Bai L., Yao L., Li C., Wang X., Wang C. Adaptive Graph Convolutional Recurrent Network for Traffic Forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020;33:17804–17815.
13. Liu Y., Yu J.J.Q., Kang J., Niyato D., Zhang S. Privacy-Preserving Traffic Flow Prediction: A Federated Learning Approach. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020;7(8):7751–7763. DOI:10.1109/JIOT.2020.2991401. EDN:MKJJWJ
14. Yu B., Yin H., Zhu Z. Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks: A Deep Learning Framework for Traffic Forecasting. *arXiv:1709.04875v4*. 2018. DOI:10.24963/ijcai.2018/505
15. Liu Y., Yu J.J.Q., Kang J., Niyato D., Zhang S. Privacy-Preserving Traffic Flow Prediction: A Federated Learning Approach. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020;7(8):7751–7763. DOI:10.1109/JIOT.2020.299140
16. Zhang H., Jiang S., Xuan S. Decentralized federated learning based on blockchain: concepts, framework, and challenges. *Computer Communications*. 2024;216:140–150. DOI:10.1016/j.comcom.2023.12.042. EDN:NYTCWY
17. Lian X., Zhang C., Zhang H., Hsieh C.-J., Zhang W., Liu J. Can Decentralized Algorithms Outperform Centralized Algorithms? A Case Study for Decentralized Parallel Stochastic Gradient Descent. *arXiv:1705.09056v5*. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1705.09056
18. Turazza F., Pietri M., Picone M., Mamei M. FedBGS: A Blockchain Approach to Segment Gossip Learning in Decentralized Systems. *Proceedings of the 45th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, ICDCSW, 21–23 July 2025, Glasgow, United Kingdom*. IEEE; 2025. p.760–770. DOI:10.1109/ICDCSW63273.2025.00136
19. Yu E., Dong D., Xu Y., Ouyang S., Liao X. CD-SGD: Distributed Stochastic Gradient Descent with Compression and Delay Compensation. *arXiv:2106.10796v2*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2106.10796
20. Stewart G., Al-Khassaweneh M. An Implementation of the HDBSCAN* Clustering Algorithm. *Applied Sciences*. 2022;12(5):2405. DOI:10.3390/app12052405
21. Chen C., Petty K., Skabardonis A. Freeway Performance Measurement System: Mining Loop Detector Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2001;1748(1). DOI:10.3141/1748-12
22. Sharma M., Jaggi P. Reliable federated learning in a cloud-fog-IoT environment. *The Journal of Supercomputing*. 2023;79:15435–15458. DOI:10.1007/s11227-023-05252-w. EDN:EETJGC
23. Manju B., Kumar C.S.P., Jegan J., Jagadeeshan D., Nunna S.K. Hierarchical Federated Learning with Fog Nodes: Enhancing Efficiency in Smart City Networks. *Proceedings of the International Conference on Information Technology, OCIT, 12–14 December 2024, Vijayawada, India*. IEEE; 2024. p.749–753. DOI:10.1109/OCIT65031.2024.00135
24. Lähderanta T., Lovén L., Ruha L., Leppänen T., Launonen I., Riekkii J., et al. Capacitated spatial clustering with multiple constraints and attributes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;127(Part A):107182. DOI:10.1016/j.engappai.2023.107182. EDN:CXFPOY
25. Hu J., Liu K. Raft consensus mechanism and the applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1544(1): 012079. DOI:10.1088/1742-6596/1544/1/012079. EDN:IJJLUI
26. Performance evaluation of IEEE 802.11ah systems. *Proceedings of the 24th Telecommunications Forum, TELFOR, 22–23 November 2016, Belgrade, Serbia*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/TELFOR.2016.7818748

Статья поступила в редакцию 23.03.2026; одобрена после рецензирования 18.04.2026; принята к публикации 23.04.2026


The article was submitted 23.03.2026; approved after reviewing 18.04.2026; accepted for publication 23.04.2026

Информация об авторах:

ДАНГ
Ван Тханг

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0009-2219-3767>

ВОЛКОВ
Артём Николаевич

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0002-4296-1822>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья
УДК 656.254.1
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110>
EDN:QNLEDM

Модель оценки разведзащищенности элементов локальной навигационной системы

- ✉ Сергей Алексеевич Якушенко^{1,2}, was16@mail.ru
- ✉ Владимир Юрьевич Копыльцов², vkopylcv@yandex.ru
- ✉ Алексей Анатольевич Ларионов¹, alekseilarionov2000@yandex.ru
- ✉ Дина Владимировна Васильева¹, Profinst2guap@mail.ru
- ✉ Сергей Викторович Дворников^{1,2}, practicsv@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Уязвимость систем глобального позиционирования стимулирует к развертыванию и практической эксплуатации локальных радионавигационных систем в интересах решения частных навигационных задач беспилотных авиационных систем. Прагматизм такого подхода базируется на успешности эксплуатации таких радиосистем ближней навигации, как TACAN и VOR / DME. Вместе с тем, применение беспилотных летательных аппаратов в качестве платформ для аппаратуры комплексов несанкционированного радиомониторинга и постановки помех делает локальные радионавигационные системы уязвимыми к деструктивным воздействиям. Поэтому необходима разработка комплекса мероприятий по оценке разведзащищенности линий радионавигационной информации и, в перспективе, – методов повышения их помехозащищенности.

Цель: создание математической модели для исследования и оценки разведзащищенности элементов локальных радионавигационных систем на основе совпадения импульсных потоков. Для этого использовались **методы** энергетического расчета линий радиосвязи, теория вероятностей, формализации процедур поиска сигналов на основе теории импульсных потоков.

Результаты: разработана частная модель функционирования локальной радионавигационной системы обслуживания беспилотных авиационных платформ; уточнен аналитический аппарат для модели радиомониторинга сигналов источников радиоизлучений с учетом пространственного, частотного и временного совпадения диаграмм направленности антенн приемника поиска и излучаемого в импульсном режиме радионавигационного сигнала; получены зависимости вероятности электромагнитной доступности источников радиоизлучений от дистанции мониторинга при различной ширине диаграмм направленности антенны приемника поиска; формализованы процедуры поиска навигационных сигналов в виде импульсного потока; рассчитаны зависимости вероятности и времени совпадения импульсных потоков, характеризующих процедуры поиска и функционирования локальных радионавигационных систем.

Практическая значимость: результаты работы могут использоваться при развертывании локальных радионавигационных систем для обеспечения их разведзащищенности в зависимости от потенциальной дальности мониторинга при различной ширине диаграммы направленности антенны приемника поиска.

Ключевые слова: локальная радионавигационная система, оценка разведзащищенности, процедуры поиска сигналов в терминах теории совпадающих импульсных потоков, электромагнитная доступность

Ссылка для цитирования: Якушенко С.А., Копыльцов В.Ю., Ларионов И.А., Васильева Д.В., Дворников С.В. Модель оценки разведзащищенности элементов локальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 98–110. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110. EDN:QNLEDM

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110>

EDN:QNLEDM

Model for Assessing the Intelligence Protection of Local Navigation System Elements

- ✉ **Sergey A. Yakushenko**^{1,2}, was16@mail.ru
Vladimir Yu. Kopyltsov¹, vkopyltcov@yandex.ru
Alexey A. Larionov¹, alekseilarionov2000@yandex.ru
Dina V. Vasilyeva¹, Profinst2guap@mail.ru
Sergey V. Dvornikov^{1,2}, practicsv@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

²Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Аннотация

Relevance. The vulnerability of global positioning systems stimulates the deployment and practical operation of local radio navigation systems in order to solve specific navigation tasks for unmanned aerial systems. This approach is based on the successful operation of short-range navigation systems such as TACAN and VOR/DME. However, the use of unmanned aerial vehicles as platforms for unauthorized radio monitoring and jamming systems makes local radio navigation systems vulnerable to destructive interference. Therefore, it is necessary to develop a set of measures to assess the intelligence protection of radio navigation information lines and, in the future, to develop methods to improve their interference protection.

Objective: to create a mathematical model for researching and evaluating the intelligence protection of elements of local radio navigation systems based on the coincidence of impulse streams.

Methods: energy calculation methods for radio communication lines, probability theory, and formalization of signal search procedures based on pulse flow theory.

Results: a private model of the functioning of a local radio navigation system for servicing unmanned aircraft platforms has been developed; an analytical apparatus for a model of radio monitoring of radio source signals has been refined, taking into account the spatial, frequency and time coincidence of the antenna patterns of the search receiver and the radio navigation signal emitted in pulsed mode; dependences of the probability of electromagnetic availability of radio sources on the monitoring distance for different antenna pattern widths have been obtained. the search receiver; the procedures for searching for navigation signals in the form of a pulse stream are formalized; the dependences of the probability and time of coincidence of pulse streams characterizing the search procedures and the functioning of local radio navigation systems are calculated.

Practical significance: the results of the work can be used in the design of the deployment of local radio navigation systems, taking into account the dependence of the probability of revealing radio emission sources on the potential monitoring range at different antenna beam widths.

Ключевые слова: local radio navigation system, assessment of intelligence protection, signal search procedures in terms of the theory of coinciding impulse flows, electromagnetic accessibility

For citation: Yakushenko S.A., Kopyltsov V.Yu., Larionov I.A., Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V. Model for Assessing the Intelligence Security of Local Navigation System Elements. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):98–110. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110. EDN:QNLEDM

Введение

В настоящее время системы глобального позиционирования все чаще подвергаются деструктивным воздействиям со стороны международных

террористических организаций [1, 2]. В таких условиях целесообразным видится переход к развертыванию и практической эксплуатации локальных радионавигационных систем (ЛРНС) [3]. Эффек-

тивность данного подхода обусловлена возможностью развертывания наземных опорных станций (ОС), связанных сетью с центральной опорной станцией (ЦС) и работающих в системе единого времени. Прагматизм предлагаемой стратегии базируется на успешности эксплуатации таких радиосистем ближней навигации, как TACAN и VOR / DME, функционирующих в диапазоне 108–118 МГц, а также отечественной системы РСБН (полоса частот 873,6–935,2 МГц) [4]. Высокий диапазон частот обеспечивает мобильность таких ЛРНС, что является актуальным моментом с позиций развертывания на неподготовленных в техническом плане территориях, а использование антенных систем с управляемыми диаграммами направленности наделяет их приемлемой помехозащищенностью. Вместе с тем применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве платформ для аппаратуры комплекса радиомониторинга и постановки помех (КРПП) делает ЛРНС уязвимыми к деструктивным воздействиям [5].

В целях исследования такой ситуации была разработана математическая модель оценки разведзащищенности элементов (объектов) ЛРНС, базирующаяся на элементах теории совпадения импульсных потоков, которая представлена в статье.

Описание структуры модели ЛРНС

Будем полагать, что в общем случае ЛРНС состоит из нескольких наземных ОС и ЦС, причем работа такой сети ведется в импульсном режиме. ОС излучают радионавигационные сигналы [6], тем самым образуя радионавигационную сеть, управляемую посредством ЦС (рисунок 1). ЦС принимает сигналы от всех ОС и решает навигационную задачу, результаты которой передает на объекты навигации (ОН), в качестве которых рассмотрим группу беспилотных авиационных систем (БАС), выполняющих задачи по радиолокационному зондированию местности в интересах картографии.

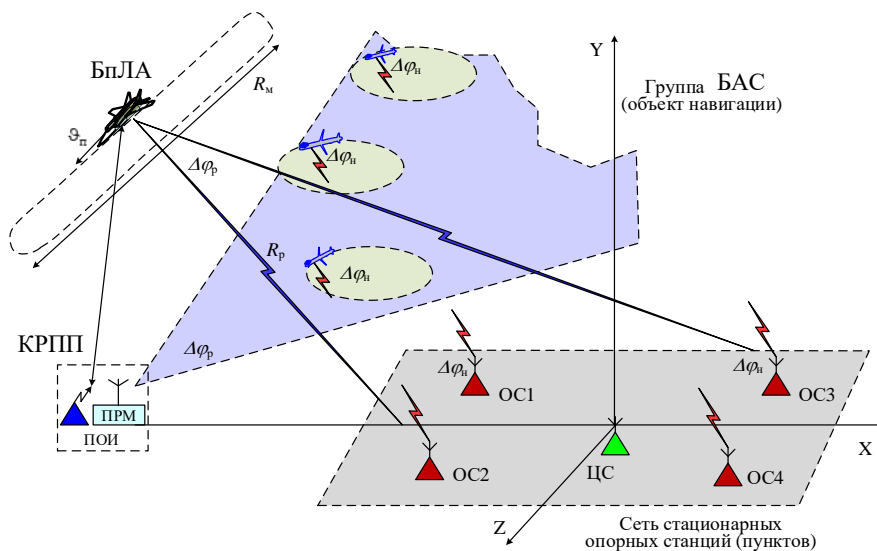


Рис. 1. Модель функционирования ЛРНС

Fig. 1. Model of Functioning of the LRNS

Далее будем полагать, что модель позиционирования БАС использует асинхронно разностно-дальномерный (А-РД) способ для определения в пространстве своего местоположения [7]. Такой способ позволяет обойтись без реализации процедуры предварительной синхронизации часов на ОС. Это достигается за счет того, что радионавигационные сигналы ретранслируются от ОС на ЦС [6]. При этом эти те же сигналы принимает ЦС по радиоканалу прямой видимости от БАС, что дает ей возможность компенсировать нестабильность своих опорных генераторов.

Таким образом, согласно модели, каждый БАС принимает n -импульсных потоков радионавигационных сигналов от наземных n -ОС и далее ретранс-

лируют их на ЦС. Поскольку все ОС работают в верхнем субдиапазоне высоких частот и нижней части диапазона крайне высоких частот, то станции ЛРНС размещаются на местности с учетом обеспечения прямой видимости, как с БАС, так и друг с другом.

Радионавигационные сигналы в такой ЛРНС представляют собой импульсную последовательность с постоянной длительностью импульсов и псевдослучайным периодом их следования [6, 8]. Закон модуляции для каждой ОС $_i$, $i = 1, 2, \dots, N$, задает период перед началом работы. Временные параметры радионавигационных сигналов ОС приведены на рисунке 2а [9].

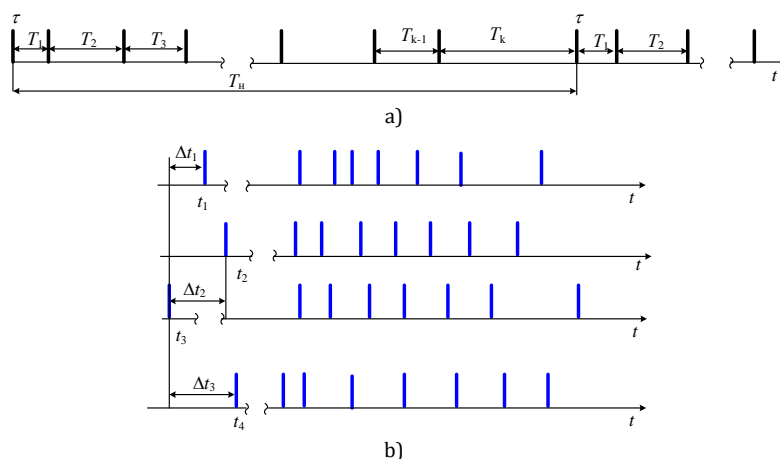


Рис. 2. Структура навигационного сигнала с изменяемым периодом повторения: а) временные параметры; б) групповой синхронизированный навигационный сигнал

Fig. 2. Structure of a Navigation Signal with a Variable Repetition Period: a) Timing Parameters; b) Group Synchronized Navigation Signal

Временное разделение сигналов осуществляется посредством привязки к шкале времени ЦС за счет передачи синхросигналов на каждую ОС. Для обеспечения однозначного взаимного расположения сигналов на шкале импульсной последовательности прихода импульсов от ОС_{*i*} в ЦС, исключающего их одновременный приход, необходимо выполнять коррекцию шкал времени ОС [8]. Такая коррекция осуществляется путем вычисления величины расхождения моментов времени отсчета импульсов последовательностей, генерируемых каждой из ОС (это необходимо в виду несинхронной работы передатчиков ОС).

Результат рассогласования (например, для четырех ОС), определяемый как разность, дает величину расхождения шкалы времени *i*-ых ОС относительно времени *t_ц* ЦС:

$$t_i - t_{ц} = \Delta t_{иц},$$

где *i* = 1, 2, 3, 4.

Значение $\Delta t_{иц}$ определяет индивидуальную поправку для шкалы времени передатчика соответствующего *i*-ой ОС (рисунок 2б). Использование на каждом ОС_{*i*} сигналов с уникальной временной структурой следования импульсов повышает устойчивость ЛРНС к имитационным помехам [10, 11], а также снижает возможность любого несанкционированного доступа в радионавигационную систему. В рамках ЛРНС время цикла навигации составляет 200 мс.

Нарушитель будет использовать деструктивное радиоэлектронное воздействие, приводящее или к энергетическому подавлению сигналов, или к локальной деформации радионавигационного поля. Поэтому радиоэлектронные воздействия будут или в виде шумовых помех (активное энергетическое радиоподавление), или структурных помех

(ложная радиоимитация) [10]. Очевиден выбор последнего подхода, поскольку он менее энергоресурсно затратный, с учетом того, что часть элементов КРПП размещается на БПЛА [11].

Таким образом, проведенный анализ особенностей построения и функционирования ЛРНС позволяет заключить, что работа в импульсном режиме ЛРНС потребует аналогичной работы от КРПП. Поэтому использование классических методов оценки радиоэлектронного воздействия [9], основанных на электромагнитной доступности (ЭМД) каналов непрерывного излучения, не позволит получить приемлемого адекватного результата.

Следовательно, необходима разработка соответствующего научно-методического аппарата, с учетом вышеприведенных особенностей, но вначале необходимо рассмотреть особенности мониторинга объектов ЛРНС.

Модель радиомониторинга объектов ЛРНС

Эффективное ведение радиомониторинга возможно только при условии ЭМД источников радиои-злучений (ИРИ) приемнику КРПП [12].

Кроме того, особенностью мониторинга ЛРНС являются наличия множества наземных и воздушных ИРИ (ОС и ретрансляторов на БАС), излучающих однотипные сигналы в форме импульсной последовательности, но с различной структурой и параметрами. Номиналы частот радионавигационных сигналов и их ширина спектра, в отличие от радиолиний ГЛОНАСС, могут быть неизвестными, поэтому нарушитель вынужден проводить частотный поиск ИРИ в широком диапазоне. Такой процесс можно описать на основе импульсного потока [13, 14], характеризующего поиск сигнала по частоте. Отметим, что процесс ведения радиомониторинга с БАС посредством антенных систем с управляемыми диаграммами направленности (ДН), может быть также

описан посредством импульсного потока, но в пространстве. Согласно рассмотренной модели, для эффективного ведения радиомониторинга ЛРНС необходимо выполнение ряда условий. Это наличие электромагнитной доступности, а также частотно-временного и пространственного совпадения сигналов объектов ЛРНС и ДН приемника поиска КРПП [15]. Очевидно, что такой поиск будет носить случайный характер, который может быть оценен вероятностно-временными показателями, а именно вероятностью и временем вскрытия радионавигационных линий ИРИ ЛРНС.

В общем случае вскрытие радионавигационных линий ИРИ системой поиска КРПП зависит от вероятности обнаружения $p_{обн}$ ИРИ и вероятности его распознавания $p_{расп.}$ Данные события независимы, поэтому вероятность вскрытия равна:

$$p_{вскр} = p_{обн} p_{расп.} \quad (1)$$

В свою очередь, вероятность обнаружения ИРИ предусматривает выделение сигнала на фоне помех: установление факта наличия радиоизлучения в пространстве в определенный момент времени на заданной частоте (в полосе частот) и проведение первичного анализа (определение среднего значения частоты несущей, полосы частот сигнала, его структура, вид модуляции и т. п.). Математически результаты обнаружения можно записать выражением [16]:

$$p_{обн} = p_{эмд} p_{к}, \quad (2)$$

где $p_{эмд}$ – вероятность ЭМД; $p_{к}$ – вероятность пространственного и частотно-временного контакта импульсных потоков.

ЭМД радиоизлучений (ОС ЛРНС и ретрансляторов на БПЛА) к приемнику поиска КРПП в гауссовом канале определяется выражением [17]:

$$p_{эмд} = p(h \geq h_{тр}) = \Phi(u), \quad (3)$$

где $u = \gamma h$ – параметр распределения; γ – параметр модуляции (для сигналов с фазовой модуляцией $\gamma = \sqrt{2}$); $\Phi(u)$ – функция Крампа:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-t^2/2} dt = \Phi(\gamma h) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\gamma h} \exp\left(-\frac{h}{2}\right) dh.$$

При ЭМД реальное отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума h на входе приемника поиска будет не менее требуемого значения $h_{тр}$, которое определяется техническими характеристиками КРПП, т. е.:

$$h = (P_{снр}/P_{шр}) > (P_{снр}/P_{шр})^* = h_{тр}, \quad (4)$$

где $P_{шр}$ – уровень мощности шума на входе приемника; $P_{снр}$ – уровень мощности радионавигационного сигнала входе приемника [18]:

$$P_{шр} = k_6 T_{шр} \Delta F_{пм},$$

где $k_6 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ ВтГц/град – постоянная Больцмана; $\Delta F_{пм}$ – полоса пропускания приемника, согласованная с шириной спектра навигационного сигнала $\Delta F_{сн}$; $T_{шр}$ – шумовая температура приемника разведки ($T_0 = 273^\circ + t^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды в Кельвинах):

$$T_{шр} = (n_{ш} - 1) T_0,$$

где $n_{ш}$ – коэффициент шума приемника поиска.

Значение медианной мощности сигнала на входе приемника разведки определяется в соответствии с первым уравнением связи [19]:

$$P_{снр} = P_{пдн} + W_{пдн} + G_{пдн}(\varphi_{нр}) + W_{\Sigma} + G_{пмр} + W_{пмр}, \quad (5)$$

где $P_{пдн}$ – уровень мощности радионавигационного сигнала на выходе передатчика ИРИ; $G_{пдн}(\varphi_{нр})$ – коэффициент усиления передающей антенн ОС в направлении приемника поиска; $G_{пмр}$ – коэффициент усиления приемной антенны КРПП; $W_{пдн}$ – затухание в фидере передатчика ИРИ; $W_{пмр}$ – затухание в фидере приемника поиска [10]; W_{Σ} – суммарное затухание на трассе поиска (W_p – дополнительное затухание радиосигнала, вносимое рельефом местности; $W_{атм}$ – дополнительное затухание радиосигнала, вызываемое атмосферой; $W_{св}$ – затухание в свободном пространстве):

$$W_{\Sigma} = W_{св} + W_p + W_{атм}.$$

Затухание в свободном пространстве равно:

$$W_{св[дБ]} = 10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi R_p}{\lambda}\right)^2 \quad (6)$$

или

$$W_{св} = 92,45 + 20 \lg(f_{[Гц]}) + 20 \lg R_{p[км]},$$

где R_p – дальность поиска; λ – длина волны передатчиков ИРИ.

Дальность между БПЛА поиска и ИРИ, размещенными на БАС, можно определить по уравнению прямой видимости [18, 19]:

$$R_p = \sqrt{h_p^2 + R_{пз}^2}, \quad (7)$$

где R_p – дальность между БПЛА разведки и ИРИ по поверхности Земли; h_p – высота полета БПЛА поиска.

Остальные параметры определяются техническими характеристиками КРПП и ИРИ. Учитывая, что мониторинг ИРИ ведется с БПЛА с применением направленных антенн с узкими ДН, то будем полагать, что расширение зоны пространственного поиска достигается прокладкой и итерационного маршрута полета протяженностью R_m вдоль зоны мониторинга (такой выбор авторами сделан

умышленно, т. к. это самые сложные условия для обеспечения разведзащищенности). В современных КРПП поиск ИРИ в широком диапазоне частот реализуется автоматически, посредством сканирующих приемников, анализирующих обнаруженные сигналы. Результаты оценки ЭМД ИРИ приемнику поиска, размещенного на платформе БПЛА, представлены на рисунке 3.

Результаты получены, исходя из следующих исходных данных: $P_{\text{пдн}} = 10$ Вт; $G_{\text{пдн}} (\varphi_{\text{нр}}) = 3$ дБ; $G_{\text{пмп}} = 18, 12, 8, 6$ дБ; $\Delta F_c = 200$ МГц; $h_{\text{тр}} = 5$ дБ; затухание в фидерных линиях не более 3 дБ.

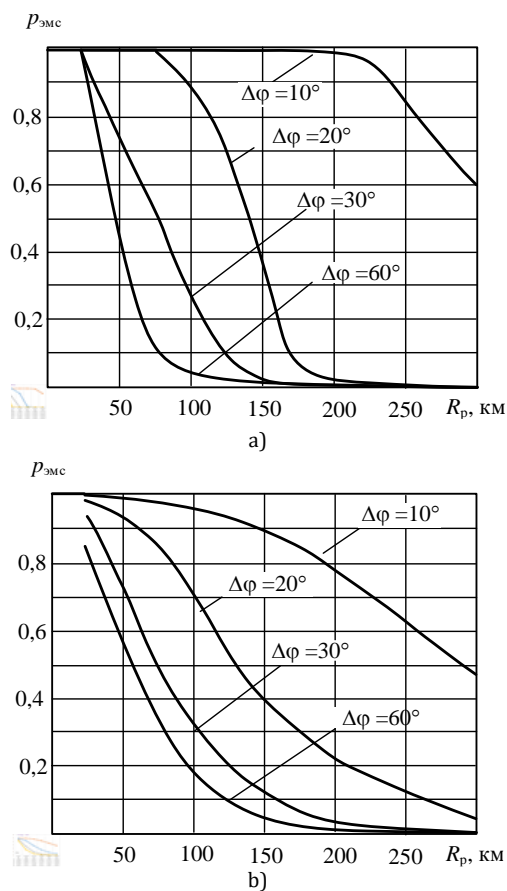


Рис. 3. Зависимость вероятности ЭМД ИРИ от дальности поиска при различной ширине ДН антенны приемника КРПП в гауссовом (а) и райсовском (б) каналах связи

Fig. 3. Dependence of the Probability of EML IRI on the Search Range for Different Widths of the RPMS Monitoring Receiver Antenna in a Gaussian (a) and Rician (b) Communication Channels

Анализ полученных на рисунке 3 графиков показывает, что ЭМД ИРИ не превышает 240 км для гауссова и 150 км для райсовского канала связи при использовании узких ДН антенн поисковых приемников. С увеличением ширины ДН антенны до 60° зона ЭМД значительно сокращается – до 30 км.

Формализация процедур временного контакта ИРИ и приемника поиска КРПП

Вероятность контакта приемников поиска КРПП с излучениями ИРИ ЛРНС в пространственной и частотно-временной области зависит от степени совпадения (пересечения) их ДН с ДН передатчиков ИРИ ЛРНС, а также от размеров частотного диапазона поиска и ширины спектра радиосигналов ИРИ [20, 21]. Обнаружение сигнала происходит только в том случае, когда радиоизлучение передатчика попадает в сектор главного лепестка ДН антенны приемника поиска. Т. е. ДН приемника и передатчика в этом случае должны быть сонаправленными.

Количественно время контакта можно оценить длительностью импульса, характеризующего процедуру доступности $\tau_{\text{нр}}$ радиоизлучения ИРИ для приемника поиска. В противном случае ИРИ будет недоступен КРПП. Такому условию будет соответствовать пауза $\tau_{\text{нпр}}$. С таких позиций процесс поиска сигналов ИРИ в пространстве можно представить импульсным потоком во времени с длительностью пространственного контакта ДН антенны приемника мониторинга с радиоизлучением ИРИ ЛРНС во временной области.

Длительность импульса, характеризующего такой контакт, будет равна [9, 22]:

$$\bar{\tau}_{\text{нр}} = \bar{T}_{\text{мп}} - \bar{\tau}_{\text{нпр}} = \frac{\bar{r}_p}{\bar{v}_n} = \frac{\Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n}, \quad (8)$$

где $\bar{T}_{\text{мп}}$ – среднее значение периода патрулирования БПЛА КРПП на маршруте полета; $\bar{\tau}_{\text{нр}}$ – средняя продолжительность поиска i -ой ОС (импульса от ИРИ ЛРНС, далее по тексту как ОС); $\bar{\tau}_{\text{нпр}}$ – средняя продолжительность паузы при поиске i -ой ОС; \bar{r}_p – средняя протяженность полета БАС, при котором осуществляется прием радионавигационных сигналов (контакт с ИРИ); $\Delta\varphi_p$ – ширина ДН антенны приемника поиска в радианах; \bar{v}_n – средняя скорость полета БПЛА на маршруте; \bar{R}_p – средняя дальность дистанции поиска сигналов ИРИ ЛРНС.

При этом интервал паузы разведки i -ой ОС равен:

$$\bar{\tau}_{\text{нпр}} = \bar{T}_m - \bar{\tau}_p = \frac{\bar{R}_m}{\bar{v}_n} - \frac{\Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n} = \frac{\bar{R}_m - \Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n}, \quad (9)$$

где \bar{R}_m – средняя протяженность маршрута патрулирования БПЛА КРПП.

Период поиска можно определить как:

$$\bar{T}_{\text{мп}} = \bar{T}_1 = \bar{R}_m / \bar{v}_n. \quad (10)$$

Таким образом, процедуру сканирования приемником поиска сигналов ИРИ в пространстве можно представить импульсной последовательностью с длительностью $\bar{\tau}_p = \bar{\tau}_1$ и периодом \bar{T}_1 (рисунок 4а) [22, 23].

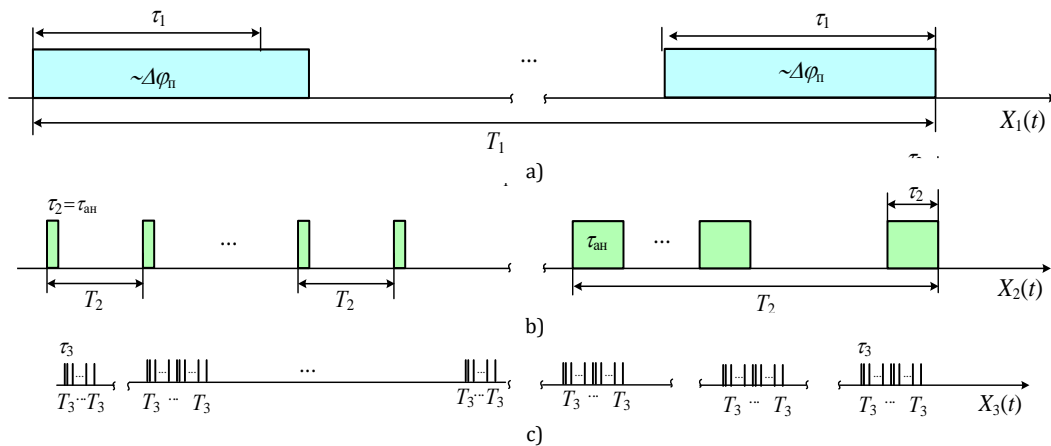


Рис. 4. Схематическое представление процедуры поиска навигационных сигналов в виде импульсного потока: а) сканирования в пространстве; б) сканирования по частоте; в) излучения радионавигационных сигналов

Fig. 4. Schematic Representation of the Search Procedure for Navigation Signals in the Form of a Pulse Stream: a) Spatial Scanning; b) Frequency Scanning; c) Emission of Radio Navigation Signals

Сканирование частотного диапазона приемник поиска КРПП осуществляет в диапазоне частот с шагом, равным полосе частот, сопряженной с шириной полосы радионавигационного сигнала. При этом на каждом шаге (интервале частот) осуществляется анализ присутствия сигнала и его параметров для выделения первичных признаков. Затрачиваемое время на анализ $\tau_{ан}$ зависит от технических возможностей приемника поиска. Приемник поиска перестраивается по частоте в диапазоне ведения мониторинга $\Delta F_{др}$.

Общее количество полос сканирования в диапазоне поиска равно:

$$N_f = \Delta F_{др} / \Delta F_c,$$

а период частотного сканирования приемника:

$$\bar{T}_f = \bar{T}_2 = \Delta F_{др} / \bar{\gamma}_p, \quad (11)$$

где γ – средняя скорость перестройки приемника поиска.

Следовательно, сканирование частотного диапазона также можно представить импульсной последовательностью с длительностью $\bar{\tau}_2$ и периодом \bar{T}_2 (см. рисунок 4б).

Таким образом, обнаружение радиоизлучений в заданном диапазоне частот возможно при одновременном выполнении следующих событий: радиоизлучение радионавигационного сигнала присутствует, и оно энергетически доступно приемнику поиска (рисунок 4с), существует пространственный и временной контакт приемника поиска с частотой радиоизлучений ОС. При таком подходе модель мониторинга радионавигационных сигналов может быть представлена в виде оконной функции [24], равной по амплитуде единице в момент совпадения

пространственных, частотных и сигнальных импульсов во времени, и нулю в противном случае, как это изображено на рисунке 4.

Согласно рисунку 4, продолжительности радиоизлучения навигационных сигналов поставим в соответствие импульсный поток 3 длительностью τ_3 и периодом T_3 . Продолжительности частотной доступности (контакта) радиоизлучения ОС к приемнику поиска поставим в соответствие поток импульсов 2 длительностью τ_2 и периодом следования T_2 . Продолжительности пространственной доступности (контакта) ДН приемника поиска с ИРИ поставим в соответствие последовательность импульсов 1 длительностью τ_1 и периодом следования T_1 . Тогда наступление события совпадения во времени импульсных потоков (пространственного, частотного и сигнального) является фактом обнаружения сигнала ИРИ, а при вероятности распознавания равной единицы – фактом вскрытия радионавигационных линий ЛРНС.

В (8–11) продолжительности импульсов представляют собой средние значения параметров импульсных потоков, что связано с их некоторым случайным их разбросом. Данный разброс можно оценить допустимым среднеквадратическим отклонением от среднего значения $\sigma^2(\tau) = \overline{\tau^2(\xi)} - \overline{\tau(\xi)}^2$. Тогда относительная погрешность измерения τ вследствие временной асимметрии при накоплении импульсов равна:

$$\sigma = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \Delta t_{i+1}). \quad (12)$$

Данная погрешность пренебрежимо мала, т.к. временные интервалы Δt_i и Δt_{i+1} следующих друг за другом импульсов отличаются незначительно, т.е.:

$$(\Delta t_{i+1} - \Delta t_i) / \Delta t_i \ll 1,$$

и вышеприведенные импульсные потоки можно рассматривать как квазипериодические.

Приложение теории импульсных потоков к решению задачи поиска сигналов ИРИ

Из вышеприведенного анализа следует, что процесс ведения поиска можно формализовать различными импульсными потоками во времени, различающихся по длительности и частоте следования импульсов. Такой подход позволяет разработать методический аппарат оценки показателей разведзащищенности радионавигационных линий ЛРНС на основе теории совпадения импульсных потоков [25]. Для этого проанализируем импульсные потоки, характеризующие subprocesses процедуры поиска сигналов ИРИ.

Импульсные потоки в пространстве можно считать детерминированными с периодом следования T_1 и длительностью τ_1 (см. рисунок 4а), что обеспечивается регулярностью процесса ведения поиска. При этом параметры импульсного потока зависят от протяженности маршрута полета БПЛА, ведущего мониторинг, его скорости и ширины ДН антенны приемника поиска.

Импульсный поток, описывающий процедуры поиска сигналов ИРИ по частоте, также можно считать детерминированным, т. к. его параметры – цикл перестройки T_2 и длительность анализа признаков τ_2 – определяется технологиями построения приемника поиска.

Радионавигационные сигналы ОС ЛРНС индивидуальны и обладают высокой структурной скрытностью, т. к. формируются по псевдослучайному закону. И при этом они коррелированы относительно друг друга. В интересах одновременного совпадения таких потоков во временной области необходимо, чтобы произошло событие пространственного совпадения потоков, характеризующих работу ЛРНС $X_1(t)$, $X_2(t)$ и $X_3(t)$ с циклами поиска.

Для этого введем следующие ограничения:

– каждый поток X состоит из не пересекающихся во времени импульсов, когда:

$$\tau_i = t_i - t_{i-1} > \tau_{i-1} \tag{13}$$

где t_i , t_{i-1} – момент появления i -го импульса; τ_i – длительность i -го импульса;

– импульсные потоки стационарны, т. е. их числовые характеристики на зависят от времени, например, математическое ожидание случайной величины интервала импульса (τ) не зависит от времени:

$$\bar{\tau} = \int_0^\infty \tau \omega(\tau) d\tau, \tag{14}$$

где $\omega(\tau)$ – плотность вероятности случайной величины длительностей τ импульсов.

В задачах поиска и обнаружения радиосигналов практический интерес представляют импульсы, принадлежащие потоку совпадений, длительность которых больше длительности минимального импульса этих потоков $\tau_i \geq \tau$. Доля перекрытия потоков импульсов является случайной величиной, а ее значение может быть любым.

Далее будем считать, что контакт состоялся, если длительность импульсов совпадения τ потоков будет не менее длительности анализа (выделения) первичных признаков радионавигационного сигнала, т. е. $\tau \geq \tau_{ан}$. [26].

Для решения рассматриваемой задачи найдем соотношения применительно к этому условию, в рамках соответствия ограничениям. При этом будем полагать, что распределение длительностей импульсов каждого из n стационарных и независимых потоков $X_s(t)$ ($s = 1, 2, 3, \dots, n$) заданы равномерными плотностями вероятностей $\alpha_s(\tau)$. В процессе совпадения участвуют импульсы n – стационарных и независимых потоков, каждый из которых удовлетворяет требованию (13), а длительность $\tau_{n,k}$ импульсов совпадений является всегда величиной случайной.

Тогда распределение длительностей импульсов потока совпадения, образованных в результате перекрытия во времени k из n импульсов, определяется плотностью вероятностей вида:

$$\alpha_{n,k}(\tau) = \frac{1}{\mu_{n,k}} \frac{d^2}{d\tau^2} P_{n,k}(\tau), \tag{15}$$

где $\overline{\mu_{n,k}}$ – средняя частота совпадений k импульсов в n потоках; $P_{n,k}(\tau)$ – вероятность совпадения k импульсов различных потоков из n возможных потоков.

В случайный момент времени средняя частота совпадений k из n импульсов вычисляется при условии, что продолжительность перекрытия $\tau \geq \tau_{ан}$ находится по формуле [9]:

$$\overline{\mu_{n,k}(\delta)} = \overline{\mu_{n,k}} \int_0^\infty \alpha_{n,k}(\tau) d\tau = -\frac{d}{d\delta} p_{n,k}(\tau - \delta), \tag{16}$$

где δ – заданная величина укорочения перекрытия импульсов совпадения.

Для успешного поиска и обнаружения в поставленной задаче необходимо выполнение условия $n = k$. Тогда положив в (15) $n = k$, и выполнив дифференцирование по δ , получим выражение для средней частоты следования импульсов совпадения:

$$\overline{\mu_{n,n}(\delta)} = \sum_{s=1}^n \frac{\int_0^Y \alpha_s(\tau) d\tau}{\int_0^Y (\tau - \delta) \alpha_s(\tau) d\tau} \times \tag{17}$$

$$\times \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \int_0^Y (\tau - \delta) \alpha_s(\tau) dt.$$

В соответствии с вышеприведенными условиями длительности импульсов фиксированы, т. е.:

$$\alpha_i(\tau) = \delta(\tau - \tau_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

где $\delta(x)$ – дельта функция.

Тогда выражение (17) примет вид:

$$\overline{\mu_{n,n}(\delta)} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s - \delta} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i(\tau_s - \delta). \quad (19)$$

Без укорочения импульсов совпадения ($\delta = 0$), согласно выражению (17), имеем:

$$\overline{\mu_{n,n}} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \tau_i, \quad (20)$$

где $\mu_i = 1/T_i$ – частота следования i -го импульсного потока.

Вероятность совпадения импульсов потоков, образованного в результате перекрытия во времени независимых и стационарных потоков, равна:

$$p_{n,n} = \overline{\mu_{n,n} \tau_{n,n}} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \tau_i. \quad (21)$$

В предоставленных потоках два – детерминированные, а один – случайный. Тогда при выполнении равенства $n = k$ с учетом выражения (18) после аналогичных преобразований (15–21), получим формулу для определения вероятности совпадения импульсов n -потоков:

$$p_{n,n}(\tau_0) = \prod_{s=1}^n \left(1 - \frac{\tau}{\tau_s}\right) \frac{\sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s - \tau_0}}{\sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s}}, \quad (22)$$

где τ_0 – минимальная длительность совпадения импульсов потока совпадений, равная $\tau_{ан}$.

Применительно к решаемой задаче для случая, когда $\tau_i \leq T_i$, $T_3 \leq T_2 \leq T_1$ ($i = 1, 2, 3$), могут быть определены следующие вероятностно-временные показатели совпадения импульсов и временные характеристики:

1) $\bar{\mu}_3 = \frac{T_1 T_2 T_3}{(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}$ – средняя частота совпадения трех потоков;

2) $p_3(T_2) = T_2 / \bar{\mu}_3 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{T_1 T_3}$ – вероятность совпадения импульсных потоков приемника разведки с радиоизлучением ОС за один период;

3) $t_p = T_2 \frac{\ln(1-p_0)}{\ln(1-p_3(T_2))}$ – время, необходимое для совпадения импульсов потоков с заданной вероятностью p_0 (время поиска по направлению и частоте с заданной вероятностью встречи диаграмм направленности антенн, приемника поиска и излучения ОС).

Результаты оценки вероятности контакта ИРИ с приемником поиска, размещенном на БПЛА при различной ширине ДН антенны приемника поиска приведены на рисунке 5.

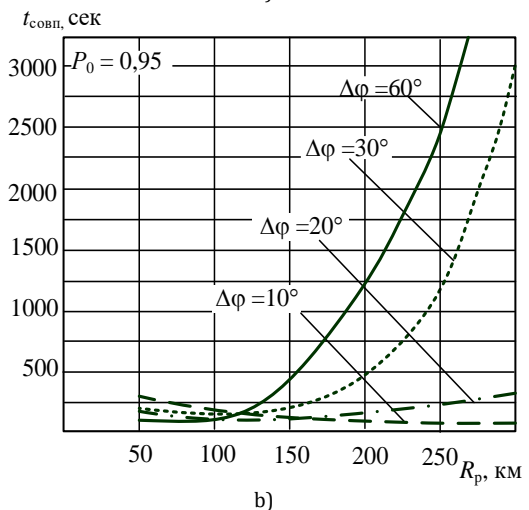
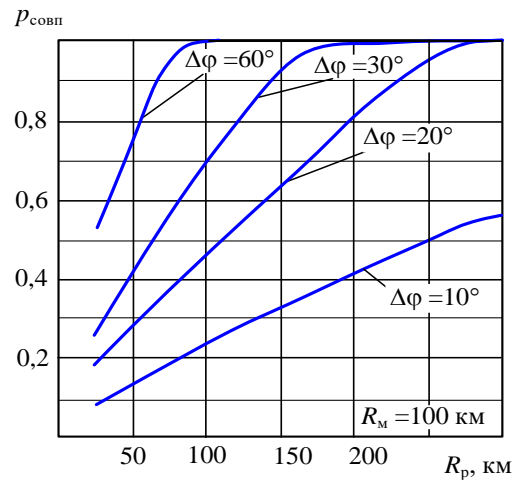


Рис. 5. Зависимость вероятности (а) и времени (б) совпадения импульсных потоков за один пространственный цикл от дальности мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска КРПП

Fig. 5. Dependence of the Probability (a) and Time (b) of Coincidence of Pulse Flows in One Spatial Cycle on the Monitoring Range for Different Widths of the Antenna of the KRPP Search Receiver

Результаты вычислений показывают, что вероятность совпадения (обнаружения) импульсных потоков повышается с увеличением дальности мониторинга. Она стремится к единице при широкой ДН антенн приемника поиска вплоть до 150 км. Однако при ее сужении до 10° вероятность контакта значительно уменьшается и становится приемлемой лишь на дальности до 30 км.

Время вскрытия возрастает с увеличением дальности мониторинга и тем быстрее, чем шире ДН антенны приемника поиска, что связано с расширением импульса пространственного контакта.

Ранее было установлено, что на вероятность вскрытия ОС влияет ЭМД радиоизлучения к приемнику поиска (1 и 2). Тогда, при условии того, что время распознавания мало, и им можно пренебречь, вероятность вскрытия можно рассматривать как совместное событие двух независимых процедур. Это ЭМД и процедуры контакта радиоизлучения ИРИ с приемником поиска в пространственной, частотной и временной областях.

Результаты оценки вероятности контакта радиоизлучения ОС с приемником поиска, размещенном на БПЛА, как функции дистанции мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска, приведены на рисунке 6.

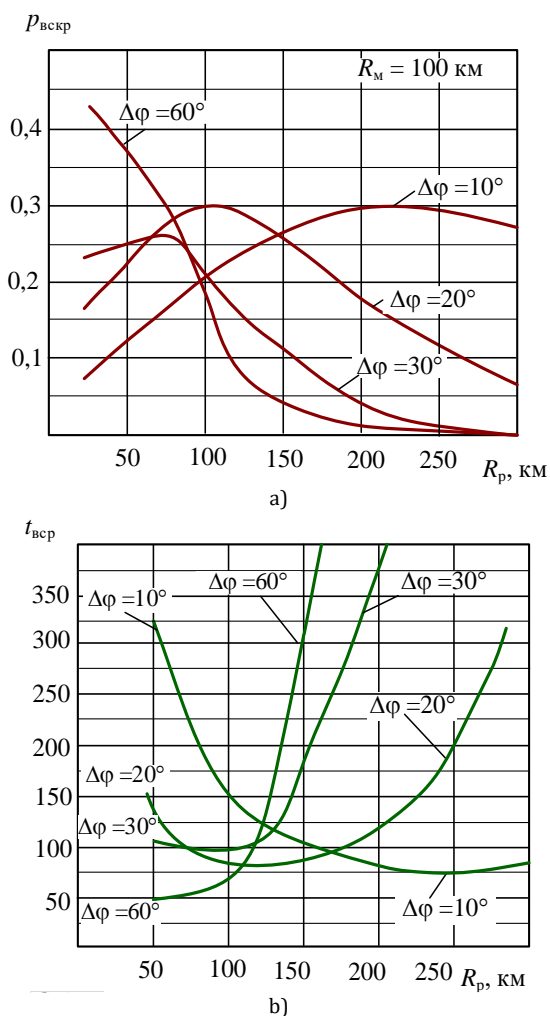


Рис. 6. Зависимость вероятности вскрытия ИРИ от дистанции мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска в гауссовом (а) и ростовском (б) каналах

Fig. 6. Dependence of the Probability of Opening an IRI on the Monitoring Range at Different Antenna Beamwidths of the Search Receiver in the Gaussian (a) and Rostov (b) Channels

При этом время, необходимое для вскрытия с требуемой вероятностью $p_{тр}$ импульсных потоков радиоизлучения передатчика ОС ЛРНС с приемником поиска за период пролета по маршруту БПЛА КРПП, можно определить по формуле:

$$t_{вскр} = T_2 \frac{\ln(1 - p_{тр})}{\ln(1 - p_{вскр})} \tag{23}$$

Используя приведенные выше выражения, были определены вероятностно-временные показатели поиска радиоизлучений ОС с БПЛА при различных дальностях мониторинга (таблица 1). Анализ полученных результатов показывает, что время вскрытия нелинейно и зависит от дистанции мониторинга.

ТАБЛИЦА 1. Результаты оценки вероятностно-временных параметров при различных параметрах ДН антенны

TABLE 1. Results of Evaluation of Probability-Time Parameters for Different Antenna Pattern Parameters

Параметры	Значения			
Ширина ДНА приемника поиска, град.	10	20	30	60
Допустимая дальность мониторинга, км	250	120	80	50
Дальность мониторинга, км	50			
Время вскрытия ИРИ, с	325	140	110	50
Дальность мониторинга, км	125			
Время вскрытия ИРИ, с	125	80	110	125
Дальность мониторинга, км	200			
Время вскрытия ИРИ, с	75	125	375	3600

Контакт приемника поиска КРПП и сигналов ИРИ ЛРНС в пространственно-частотной области определяется шириной ДН антенны приемника поиска, его параметрами и дистанцией мониторинга. Причем с увеличением дальности мониторинга вероятность контакта улучшается и вступает в противоречие с требованиями ЭМД, которая, наоборот, с увеличением дальности уменьшается. Следовательно, в зоне предельной дальности мониторинга существует наибольшее и наименьшее значение дистанций, зависящие как от ЭМД ИРИ, так и от параметров импульсных потоков поиска и сигналов ИРИ в пространственно-частотной области.

Заключение

Разработанный научно-методический аппарат оценки разведзащищенности ЛРНС позволяет определять условия успешного проведения несанкционированного мониторинга сигналов ИРИ, обеспечивающих работу группы БАС. Предложенный подход основан на формализации процедур поиска сигналов ИРИ в терминах теории совпадающих импульсных потоков, что позволило получить вероятностные и временные характеристики разведзащищенности элементов ЛРНС. Полученные результаты исследований открывают новые возможности по оценке и повышению разведзащищенности радионавигационных линий, что может использоваться для обоснования требований к ней и при проектировании защищенных ЛНС с дискретной случайной структурой радионавигационного сигнала. В дальнейших исследованиях авторы планируют оценить помехозащищенность сетей информационного обмена БАС, при их привязке к ЛРНС.

Список источников

1. Неровный В.В., Коратаев П.Д., Облов П.С., Толстых М.Ю. Характеристики уязвимости аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем к спуфинг-атакам // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 6. С. 95–100. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-6-95-100. EDN:GBDCCJ
2. 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:YQWNLJ
3. Борзов А.Б., Микаэльян С.В. Алгоритм построения собственной системы координат локальной автономной радионавигационной системы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-7. С. 1399–1405. EDN:ZAULWV
4. Бабуров В.И., Агарков А.В., Бондаренко А.П., Вострецов А.Г., Зубарев В.Ю., Кацаев Ю.А. и др. Совершенствование интегрированного бортового радиоэлектронного навигационно-посадочного оборудования // Новости навигации. 2019. № 4. С. 44–50. EDN:XCNRES
5. Лукиянов А.С., Подстригаев А.С. Методика проектирования устройства с регулируемой задержкой для системы радиотехнического обзора комплекса радиомониторинга // Морская радиоэлектроника. 2025. № 1(91). С. 14–20. EDN:UQSGHJ
6. Бурлаков С.О., Снежко В.К., Якушенко С.А., Егрушев В.Е., Веркин С.С., Антонов В.В. Синтез топологии интегрированной системы навигации и связи, функционирующей в условиях воздействия помех // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 1-1(76). С. 15–18. DOI:10.24412/2500-1000-2023-1-1-15-18. EDN:LRJGDG
7. Симонов А.Н., Волков Р.В., Дворников С.В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие. СПб.: ВАС, 2017. 248 с. EDN: XRBXML
8. Лукиянов А.С., Подстригаев А.С. Оценка повышения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в условиях сложной сигнальной обстановки, при использовании устройств задержки // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 3. С. 13–21. DOI:10.18127/j20700784-202403-02. EDN:QIMNQR
9. Якушенко С.А., Тихоненкова О.В., Сатдинов А.И. Электромагнитная деформация высокоточного радионавигационного поля потребителей бассейнов внутренних водных путей России // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 4. С. 53–61. DOI:10.18127/j20700814-202404-06. EDN:GVCCGB
10. Бондаренко В.Н., Гарифуллин В.Ф., Краснов Т.В., Галеев Р.Г. Помехи множественного доступа в широкополосных системах радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 3. С. 313–318. EDN:TUWLUN
11. Неровный В.В., Паринов М.Л., Облов П.С., Коратаев П.Д. Моделирование и анализ вероятностных характеристик функционирования малоканальной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях имитирующих помех // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 7. С. 118–123. DOI:10.18127/j00338486-202407-21. EDN:RBUPXW
12. Дворников С.В., Марков Е.В., Маноши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 6. С. 4–9. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. EDN:KNPWUMU
13. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Случайные импульсные потоки к анализу и синтезу многоуровневых систем. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2017. 308 с. EDN:LFIKYC
14. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бойчевский А.В. Оценка безотказности системы электроснабжения на основе теории импульсных потоков // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2022. № 1(15). С. 18–21. EDN:NHOTMV
15. Городов И.А., Беляев Д.В., Трошков А.В. Формализация задачи оценки эффективности системы радиомониторинга в современных условиях // Научная мысль. 2018. Т. 4. № 2(28). С. 40–48. EDN:XRRCHZ
16. Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Воропаев Д.И., Сличенко М.П., Ильин М.Ю., Серебрянникова О.А. Частотная селекция сигналов в многоканальной системе радиомониторинга с учетом ограниченной пропускной способности линии передачи данных // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 1. С. 93–99. DOI:10.18127/j00338486-202201-14. EDN:EYLQGE
17. Артемов М.Л., Гордиенко Д.Ю., Сличенко М.П., Трушин С.П. Обнаружение источников радиоизлучения по результатам многоканальной пространственно-корреляционной обработки радиосигналов в динамически меняющейся электромагнитной обстановке // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 9. С. 70–77. DOI:10.18127/j00338486-202509-07. EDN:FEJMFJ
18. Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37–48. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48. EDN:XFNWYQ
19. Снежко В.К., Якушенко С.А., Егрушев В.Е., Веркин С.С., Антонов В.В., Чеканова Е.В. Оценка доступности радиоизлучений тропосферных станций средствам мониторинга // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 1-2(88). С. 207–212. DOI:10.24412/2500-1000-2024-1-2-207-212. EDN:RHYHDO
20. Меркулов В.И., Миляков Д.А., Чернов В.С. Способы двухэтапного отождествления пеленгов в многопозиционных системах радиомониторинга воздушного базирования // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 11. С. 77–88. EDN:APYWEN
21. Подстригаев А.С., Смоляков А.В., Лукиянов А.С. Возможность использования оптико-электронного тракта в фазовом радиопеленгаторе СВЧ-диапазона в условиях динамических температурных воздействий // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 9. С. 55–65. DOI:10.18127/j20700784-202209-03. EDN:ESTDSX
22. Дворников С.В., Волков Р.В., Желнин С.Р., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Основы построения и функционирования угломерно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие. СПб.: ВАС, 2008. 104 с. EDN:WWJMJF

23. Кудряшова А.Ю., Богомолова Н.К. Алгоритм поиска радиосигналов ГЛОНАСС в программно-определяемом приемнике с частотным и кодовым разделением // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2024. Т. 14. № 4. С. 54–64. EDN:HQJDFD
24. Михайлов Н.В., Чистяков В.В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Ч. 1. Комбинированный поиск // Гирскопия и навигация. 2013. № 4(83). С. 60–71. EDN:RRTGDH
25. Пылаев Н.А. Модель составного радиоканала через ретранслятор связи на беспилотном летательном аппарате, обеспечивающая аппроксимацию его состояния потоком импульсов совпадений случайных импульсных потоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 62–71. DOI:10.24412/2071-6168-2022-2-62-71. EDN:NGHJNC
26. Кульпин С.И., Кузьмин В.Г., Орлов И.Я. Особенности блокирования приемной системы потоком импульсных помех // Датчики и системы. 2003. № 4. С. 16–19. EDN:KWNOS

References

1. Nerovny V., Korataev P., Oblov P., Tolstykh M. Vulnerability Characteristics of Global Navigation Satellite System Consumer Equipment to Spoofing Attacks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(6):95–100. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-6-95-100. EDN:GBDCCJ
2. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Alodhari A.H., Fedorenko I.V. Positioning of Mobile TV Systems on Reference Signals in LTE Networks. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2017;4:94–103. (in Russ.) EDN YQWNLJ
3. Borzov A.B., Mikaelyan S.V. Algorithm of Constructing a Domestic Coordinate System of Local Autonomous Radio-Navigation System. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(4-7):1399–1405. (in Russ.) EDN:ZAULWV
4. Baburov V.I., Agarkov A.V., Bondarenko A.P., Vostretsov A.G., Zubarev V.Yu., Katsaev Yu.A., et al. Improvement of Integrated Airborne Radio Electronic Navigational and Landing Equipment. *Navigation news*. 2019;4:44–50. (in Russ.) EDN:XCNRES
5. Lukiyanov A.S., Podstrigaev A.S. Design Methodology of a Device with an Adjustable Delay for a Radiotechnical Review System of a Radio Monitoring Complex. *Marine Radioelectronics*. 2025;1(91):14–20. (in Russ.) EDN UQSGHJ
6. Burlakov S.O., Snezhko V.C., Yakushenko S.A., Egrushev V.E., Verkin S.S., Antonov V.V. Synthesis of the Topology of the Integrated Navigation and Communication System Functioning in the Conditions of Influence. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;1-1(76):15–18. (in Russ.) DOI:10.24412/2500-1000-2023-1-1-15-18. EDN:LRJGDG
7. Simonov A.N., Volkov R.V., Dvornikov S.V. *Fundamentals of the Construction and Operation of Goniometric Systems for Coordinate Measurement of Radio Emission Sources*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2017. 248 p. (in Russ.) EDN:XRXML
8. Lukiyanov A.S., Podstrigaev A.S. Assessment of the Increase in the Proportion of Pulses Received by an RF Spectrum Management System in a Complex Signal Environment When Using Delay Devices. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2024;78(3):13–21. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700784-202403-02. EDN:QIMNQR
9. Yakushenko S.A., Tikhonenkova A.V., Satdinov A.I. Electromagnetic Deformation of a High-Precision Radio Navigation Field Consumers of the Basins of the Inland Waterways of Russia. *Information-measuring and Control Systems*. 2024;22(4):53–61. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700814-202404-06. EDN:GVCCGB
10. Bondarenko V.N., Garifullin V.F., Krasno T.V., Galeev R.G. Multiple Access Interferences in Wideband Radionavigation Systems with Spectrum-Effective Pseudonoise Signals. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technology*. 2015;8(3):313–318. (in Russ.) EDN:TUWLUH
11. Nerovny V.V., Parinov M.L., Oblov P.S., Korataev P.D. Modeling and Analysis of Probabilistic Characteristics of the Functioning of Low-Channel Equipment of Consumers of Global Navigation Satellite Systems in Conditions of Signal-Like Interference. *Radiotekhnika*. 2024;88(7):118–123. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202407-21. EDN:RBUPXW
12. Dvornikov S.V., Markov E.V., Manoshi A.A. Increasing immunity of decimeter radio channel transmissions under unintended interference. *T-Comm*. 2021;15(6):4–9. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. EDN:KHPWUM
13. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Zatsepina V.I., Zatsepin E.P. *Random Pulse Flows to the Analysis and Synthesis of Multilevel Systems*. Lipetsk: Lipetsk State Technical University Publ.; 2017. 308 p. (in Russ.) EDN:LFKIYC
14. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Boychevskiy A.V. Estimation of Power Supply System Reliability Based on Pulse Flows Theory. *Vestnik VSU. Series: Technical Sciences*. 2022;1(15):18–21. (in Russ.) EDN:NHOTMV
15. Gorodov I.A., Beliaev D.V., Troshkov A.V. The Task of Formalization of Effectiveness Estimation of the Radio Monitoring System in Modern Conditions. *Nauchnaya mysl'*. 2018;42(28):40–48. (in Russ.) EDN:XRRCHZ
16. Artemov M.L., Afanasyev O.V., Voropaev D.I., Slichenko M.P., Ilyin M.Yu., Serebryannikova O.A. Frequency selection of signals in a multichannel radio monitoring system taking into account the limited bandwidth of the data transmission line. *Radiotekhnika*. 2022;86(1):93–99. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202201-14. EDN:EYLQGE
17. Artemov M.L., Gordienko D.Yu., Slichenko M.P., Trushin S.P. Detection of radio emission sources by the results of multi-channel spatial-correlation processing of radio signals in dynamically changing electromagnetic environment. *Radiotekhnika*. 2025;89(9):70–77. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202509-07. EDN:FEJMFJ
18. Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 2. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):37–48. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48. EDN:XFNWYQ
19. Snezhko V.C., Yakushenko S.A., Egrushev V.E., Verkin S.S., Antonov V.V., Chekanova E.V. Assessment of Availability of Radio Emissions of Troposphere Stations to Monitoring Means. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2024;1-2(88):207–212. (in Russ.) DOI:10.24412/2500-1000-2024-1-2-207-212. EDN:RHYHDO
20. Merkulov V.I., Milyakov D.A., Chernov V.S. Ways of the Two-Stage Identification of Bearings in Multiposition Airborne Systems of Radio Monitoring. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2021;75(11):77–88. (in Russ.) EDN:APYWEN


21. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Lukiyanov A.S. Possibility of using a microwave photonic link in a phase direction finder of the microwave range under dynamic temperature effects. *Achievements of modern radioelectronics*. 2022;76(9):55–65. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700784-202209-03. EDN:ESTDSX
22. Dvornikov S.V., Volkov R.V., Zhelnin S.R., Sayapin V.N., Simonov A.N. *The Basics of Building and Functioning of the Angular-Distance Measuring Systems of Coordinate-free Emitters*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2008. 104 p. (in Russ.) EDN:WWJMJJ
23. Kudryashova A.Yu., Bogomolova N.K. Algorithm for Searching for GLONASS Radio Signals in a Software-Defined Receiver with Frequency and Code Division. *Digital Signal Processing and Its Applications*. 2024;14(4):54–64. (in Russ.) EDN:HQJDFD
24. Mikhailov N.V., Chistyakov V.V. Methods of searching for signals of satellite navigation systems in space-based receivers. Part 1. Combined search. *Gyroscopy and Navigation*. 2013;4(83):60–71. (in Russ.) EDN:RRTGDH
25. Pylaev N.A. Model of Composite Radio Channel Through Communication Retransmitter on Unmanned Aerial Vehicle, Which Provides an Approximation of Its State by Pulses Coincidences Sequence of Random Pulse Sequences. *Izvestiya Tula State University*. 2022;2:62–71. (in Russ.) DOI:10.24412/2071-6168-2022-2-62-71. EDN:NGHJNC
26. Kul'pin S.I., Kuzmin V.G., Orlov I.Ya. The Features of Receiving System Blocking with an Impulse Noise Flow. *Sensors and Systems*. 2003;4:16–19. (in Russ.) EDN:KWNOS

Статья поступила в редакцию 10.01.2026; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 31.03.2026


The article was submitted 10.01.2026; approved after reviewing 30.03.2026; accepted for publication 31.03.2026

Информация об авторах:


**Якушенко
Сергей Алексеевич**

доктор технических наук, доцент, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, старший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-7722-020X>


**КОПЫЛЬЦОВ
Владимир Юрьевич**

соискатель Научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0008-3547-3744>


**ЛАРИОНОВ
Алексей Анатольевич**

аспирант института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0009-0001-4322-6937>

**ВАСИЛЬЕВА
Дина Владимировна**

старший преподаватель института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0009-0009-5343-3356>

**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 им. 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.

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 + 005.21

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-112-128>

EDN:JIZXYX



Архитектурная модель ONYX для X-адаптивного управления информационной системой в условиях дестабилизирующих факторов произвольной природы

✉ Виталий Владимирович Грызунов, viv1313r@mail.ru

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Современные информационные системы функционируют в условиях перманентного действия гибридных дестабилизирующих факторов, природа которых – от целенаправленных кибератак до стохастических технических сбоев, саботажа, ухода ключевого персонала, введения санкций – часто априори неизвестна. Существующие методы управления информационными системами в условиях дестабилизирующих факторов фрагментарны: они либо сосредоточены на узких технических аспектах, либо ограничены административными регламентами, не обеспечивая целостного охвата всех иерархических уровней системы.

Цель. Разработка универсальной архитектурной модели управления ONYX, представляющей информационную систему как вычислимое пространство состояний и обеспечивающей верифицируемую адаптацию к дестабилизирующим факторам произвольной природы для сохранения ее функционала.

Методы. Состояние информационной системы представлено как атрибутированный мультиграф. Для иерархических систем введен Постулат иерархической организованности с делением на уровни: обеспечивающий, персонала, аппаратного и программного обеспечения. Валидность и легитимность состояний определяется соответственно предикатами $IsValid(s)$ и $IsIntended(s)$ на основе логики первого порядка. Управление системой реализуется оператором R на базе верифицированных шаблонов.

Результаты. Разработана модель ONYX, представляющая информационную систему в виде мультиграфа с оператором управления. Доказаны теоремы о критерии существования решения (X-адаптивность), разрешимости восстановления оператором R , инвариантности безопасности и относительной полноты оператора. Выведены следствия: эффект «Конуса влияния» и принцип уровневой нейтрализации угроз.

Научная новизна заключается в универсальности формализма для иерархических и роевых систем, определении необходимых и достаточных условий разрешимости задачи восстановления, доказательстве следствий иерархии, обосновании кросс-уровневой восстанавливаемости и введении инварианта валидности автоматического управления.

Теоретическая значимость: создание математического аппарата для управления структурной динамикой сложных систем в условиях дестабилизирующих факторов произвольной природы. Практическая значимость – в формализации требований ИБ-стандартов (ISO/IEC 27001, ГОСТ Р ИСО/МЭК 270xx, NIST CSF) для построения систем SOAR нового поколения, объединяющих организационные и технические меры.

Ключевые слова: графовая модель, информационная безопасность, логика первого порядка, упреждающее управление, X-адаптивность, иерархическая архитектура, социотехнические системы

Ссылка для цитирования: Грызунов В.В. Архитектурная модель ONYX для X-адаптивного управления информационной системой в условиях дестабилизирующих факторов произвольной природы // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 112–128. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-112-128. EDN:JIZXYX

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-112-128>
EDN:JIZXYX

Architectural Model ONYX for X-Adaptive Control of Information Systems Under Arbitrary Destabilizing Factors

 Vitaliy V. Gryzunov, viv1313r@mail.ru

Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia,
St. Petersburg, 196105, Russian Federation

Annotation

Background. Modern information systems operate under the permanent influence of hybrid destabilizing factors whose nature — ranging from targeted cyberattacks to stochastic technical failures, sabotage, key personnel departure, and sanctions imposition — is often a priori unknown. Existing methods for controlling information systems under destabilizing factors are fragmented: they either focus on narrow technical aspects or are limited to administrative regulations, failing to provide holistic coverage of all hierarchical levels of the system.

Objective. The objective is to develop a generic architectural control model, ONYX, representing an information system as a computable state space and ensuring verifiable adaptation to destabilizing factors of arbitrary nature in order to preserve its functionality.

Methods. The state of an information system is represented as an attributed multigraph. For hierarchical systems, the Hierarchical Organization Postulate is introduced, decomposing the graph into the following levels: Management, Personnel, Hardware, and Software. The validity and intendedness of states are determined by the predicates *IsValid(s)* and *IsIntended(s)*, respectively, based on first-order logic. System control is implemented by the operator *R* using a database of verified templates.

Results. The ONYX model has been developed, representing an information system as a multigraph with a control operator. Theorems have been proved on the solution existence criterion, namely *X*-adaptivity, on the solvability of recovery by the operator *R*, on safety invariance, and on the relative completeness of the operator. The following consequences have been derived: the “Cone of Influence” effect and the principle of layer-based threat neutralization.

The scientific novelty lies in the universality of the formalism for hierarchical and swarm systems, the definition of necessary and sufficient conditions for the solvability of the recovery task, the proof of the consequences of hierarchy, the substantiation of cross-level recoverability, and the introduction of a validity invariant for automatic control.

Theoretical and Practical Significance. The theoretical significance consists in creating a mathematical apparatus for controlling the structural dynamics of complex systems under destabilizing factors of arbitrary nature. The practical significance lies in formalizing the requirements of information security standards, including ISO/IEC 27001, GOST R ISO/IEC 270xx, and NIST CSF, for building next-generation SOAR systems that integrate organizational and technical protection measures.

Keywords: graph model, information security, first-order logic, preemptive control, *X*-adaptability, hierarchical architecture, socio-technical systems

For citation: Gryzunov V.V. Architectural Model ONYX for X-Adaptive Control of Information Systems Under Arbitrary Destabilizing Factors. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):111–127. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-112-128. EDN:JIZXYX

1. Введение

Современные информационные системы (ИС) функционируют в условиях постоянно возрастающего давления со стороны дестабилизирующих

факторов (ДФ) различной природы: от целенаправленных кибератак и стохастических технических сбоев до организационных ошибок, дефицита финансирования и ухода ключевых специалистов. Во-первых, на программно-аппаратный уровень

идут кибератаки: за последний год в России общее число инцидентов информационной безопасности (ИБ) в 2024 г. выросло в 2,5 раза¹. Мировые убытки от киберпреступности составили 9,22 трлн долларов в 2025 г. и достигнут 13,82 трлн к 2028 г.². Во-вторых, макроэкономические и геополитические факторы искажают условия существования ИС: в 2022 г. 68,5 % российских компаний столкнулись с проблемами из-за ухода зарубежных вендоров³. В-третьих, сама сложность ИС является внутренним источником нестабильности: рост числа пользователей до 5,64 млрд и объема данных до 180 ZB к 2025 г. создает колоссальную нагрузку, при которой час простоя критической системы стоит свыше 1 млн долларов для 44 % организаций⁴. Возникают деструктивные факторы инфраструктурного генеза [1].

Существующие подходы к управлению ИС в условиях ДФ, как правило, фрагментарны: они либо фокусируются исключительно на программно-аппаратном уровне, например, методы машинного обучения для обнаружения аномалий или теоретико-игровые модели реагирования на атаки, либо ограничиваются процессным соответствием международным стандартам (ISO/IEC 27001, NIST CSF). Однако ни один из этих подходов не обеспечивает целостного охвата всех уровней ИС – от документов и бюджетов до квалификации персонала, аппаратуры и программного обеспечения. В результате даже эффективные тактические решения не устраняют первопричины инцидентов, лежащие на более высоких иерархических уровнях.

В условиях высокой неопределенности, когда ДФ не могут быть заранее перечислены, традиционное оптимальное управление неприменимо. На смену ему приходит адаптивное управление – гибкий, самонастраивающийся подход, способный реагировать на возмущения произвольной природы. Однако и здесь сохраняется разрыв: большинство моделей адаптации по-прежнему игнорируют организационно-техническую природу ИС и не формализуют взаимосвязь между ее уровнями.

Задача обеспечения штатного функционирования ИС в условиях ДФ является предметом активных исследований. Так, например, методы на основе машинного обучения способны эффективно обнаруживать и восстанавливать данные на тактическом уровне [2], однако не решают проблему противодействия ДФ в широком смысле, игнорируя первопричины уязвимостей на более высоких иерархических уровнях – аппаратном, обеспечива-

ющем или персонала. Подходы, основанные на концепции доверия [3], изолируют узлы с вредоносным поведением, но оперируют качественными метриками и не позволяют выявить первопричину сбоя, лежащую на высших уровнях иерархии ИС.

Обучение с подкреплением [4] способно вырабатывать оптимальные стратегии защиты с помощью автономных агентов [5], однако их эффективность ограничена обучающими данными, что делает их уязвимыми перед лицом новых угроз. Теоретико-игровые модели [6] находят математически обоснованные стратегии распределения ресурсов, но требуют наличия модели атакующего и неэффективны в условиях неопределенности, когда дестабилизация вызвана сбоем, а не рациональной атакой. Модели на основе живучести [7] направлены на сохранение структурной целостности системы, в том числе иерархической [8], но не на поддержание производительности, что в первую очередь интересно пользователю.

Децентрализованные подходы [9] противодействуют отказам отдельных узлов, а механизмы стимулирования [10] позволяют координировать действия агентов, но сама их природа затрудняет реализацию глобальных, стратегических управляющих воздействий, таких как изменение регламентов или обучение персонала. Методы теории управления [11], устойчивых наблюдателей [12] и адаптивной идентификации [13] имеют математическую строгость, но обладают формальной моделью, адекватно описывающей лишь программно-аппаратный уровень.

Отдельно стоит отметить исследования в области киберфизических систем. Подходы, основанные на формальных моделях [14] и онтологиях [15], на мета моделировании [16], эффективны на этапе проектирования, но не предлагают механизмов для адаптивного управления в реальном времени. Работы, фокусирующиеся на классификации угроз [17] и уязвимостей [18], создают структурированную базу знаний, но являются описательными, а не управленческими. Даже глубокие архитектуры человеко-машинных систем [19], признающие роль человека, остаются на высоком уровне абстракции и не отвечают на вопрос, как разнородные факторы влияют на измеримый показатель эффективности системы.

Таким образом, проведенный анализ выявляет два ключевых разрыва: практически все подходы ограничиваются рассмотрением программно-аппаратного уровня, не в полной мере учитывая связь

¹The number of cyber attacks in Russia and in the world // TAdviser. 2026. URL: https://tadviser.com/index.php/Article:The_number_of_cyber_attacks_in_Russia_and_in_the_world (Accessed 11.06.2026)

² URL: <https://protectmyapp.com/cybersecurity/knowledge-base/cybercrime-statistics-key-stats-and-insights> (Accessed 28.06.2026)

³ Источник: Аналитика CNews, TAdviser, 2022–2023 гг.

⁴Global Server Hardware, Server OS Reliability Report 2022–2023. ITIC.

с уровнями обеспечения (документы, регламенты, финансы) и персонала, и опираются на предзаданные модели угроз, что снижает их эффективность в условиях неопределенности.

Настоящая работа направлена на устранение указанных разрывов. Целью исследования является разработка архитектурной модели адаптивной системы управления ИС, способной противодействовать ДФ произвольной природы и интегрировать все уровни ИС в единое вычислимое представление, т. е. формализованную структуру данных, допускающую алгоритмическую проверку валидности, расчет производительности и генерацию управляющих воздействий.

2. Иерархическая структура ИС

2.1. Формальная постановка задачи

В основе предлагаемого подхода лежит разделение на универсальное вычислительное ядро модели ONYX и предметную область, в которой функционирует ИС.

Формализм: состояние системы моделируется как атрибутированный мультиграф общего вида, что обеспечивает применимость подхода к топологиям произвольной сложности, включая mesh-сети, роевые структуры и др.

Предметное ограничение: для класса рассматриваемых в статье ИС вводится Постулат иерархической организованности (НОР, аббр. от англ. Hierarchical Organization Postulate). В любой момент времени t граф состояния $G(t)$ допускает декомпозицию на упорядоченное множество уровней:

$$\mathcal{L} = \{L_1, L_2, \dots, L_n\},$$

где:

- каждый уровень L_i представляет собой семантически однородную подсистему, например, обеспечивающую, персонала, аппаратную, программную природу;

- множества элементов уровней попарно дизъюнкты (это обеспечивается механизмом глобальной уникальной идентификации (ГУИ));

- иерархия реализуется через направленное влияние от вышестоящих уровней к нижестоящим.

Постановка задачи на исследование

Дано:

1) современная информационная система J , функционирующая в условиях действия ДФ произвольной природы;

2) требования нормативных стандартов (ISO/IEC 27001, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27035 и др.) к управлению соответствием и реагированию на инциденты ИБ;

3) отсутствие единой формализованной структуры, интегрирующей все уровни ИС в единое вычислимое представление.

Требуется разработать архитектурную основу модели адаптивного управления ИС, удовлетворяющую следующим условиям:

- формализация состояния ИС как единого атрибутированного мультиграфа, построенного на основе онтологии $\mathcal{O} = (\mathcal{L}, \Gamma, K, \mathcal{D})$, с попарно дизъюнктными множествами вершин и межуровневыми связями;

- определение предиката легитимности $IsIntended(s)$, вычислимого за полиномиальное время, формально разделяющий состояния на штатные ($S_{intended}$), инцидентные, но допустимые ($S_{incident}$), недопустимые, т. е. физически невозможные ($S \setminus S_{valid}$);

- обеспечение масштабируемости архитектуры и поддержки X -адаптивного управления как структурного свойства.

2.2. Формальное определение пространства состояний

Модель ONYX включает онтологию \mathcal{O} и пространство состояний S :

$$\mathcal{O} = (\mathcal{L}, \Gamma, K, Dom),$$

где \mathcal{L} – конечное множество уровней иерархии, например $\{Ens, P, Hard, Soft\}$; Γ – конечное множество типов связей, например, $\{\text{администрирует, размещается_на, финансирует}\}$; K – множество имен атрибутов; Dom – отображение, сопоставляющее каждому $k \in K$ конечный домен значений Dom_k .

Онтология \mathcal{O} явно задается при проектировании системы и может быть расширена без изменения ядра архитектуры ONYX. В рамках настоящей работы с сохранением общности рассматривается четырехуровневая реализация онтологии \mathcal{L} , соответствующая обеспечивающему уровню ($\ell_1 = Ens$), уровню персонала / кадровому уровню ($\ell_2 = P$), аппаратному уровню ($\ell_3 = Hard$) и программному ($\ell_4 = Soft$):

$$\mathcal{L} = \{Ens, P, Hard, Soft\}.$$

Выбор четырехуровневой структуры ONYX обоснован практикой управления ИБ и соответствует доменам ведущих стандартов: обеспечивающий уровень отражает требования к лидерству и ресурсам⁵; уровень персонала – к компетентности⁶ и культуре управления⁷; аппаратный и программный

⁵ ISO/IEC 27001:2022 Clause 5, 7.1, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27003-2012 Clause 7.1,

⁶ ГОСТ Р ИСО/МЭК 27021-2021, ISO/IEC 27001:2022 Clause 7.2

⁷ ISO/IEC 27001:2022 Annex A.8 Asset Management, COBIT

уровни – к управлению активами и технологическими средствами⁸.

Важно подчеркнуть, что архитектура ONYX не привязана жестко к этим четырем уровням. Онтология \mathcal{L} является расширяемым компонентом модели, что позволяет вводить новые уровни, например, «виртуальная структура», или агрегировать существующие без изменения ядра архитектуры путем переопределения \mathcal{L} . Пространство состояний S ИС определяется как множество атрибутированных мультиграфов, построенных на основе фиксированной онтологии уровней.

Пусть Γ – конечное множество типов связей, Σ – конечный алфавит для построения глобальных уникальных идентификаторов (ГУИ), а Σ^* – множество всех конечных строк над Σ (включая пустую строку).

Тогда состояние ИС в момент времени $t \in T \subseteq \mathbb{N}$ – это тройка:

$$s(t) = (V(t), E(t), \text{prop}),$$

где $V(t)$ – множество вершин:

$$V(t) \subseteq \bigcup_{\ell \in \mathcal{L}} (\{\ell\} \times \Sigma^*),$$

благодаря представлению вершин в виде упорядоченных пар $v = (\ell, \sigma)$, где $\ell \in \mathcal{L}$ – метка уровня, а $\sigma \in \Sigma^*$ – локальный идентификатор, принадлежность к разным уровням становится неотъемлемым свойством элемента; это обеспечивает онтологическую дизъюнктность уровней на уровне формальной модели; на практике уникальность всех элементов, в том числе внутри уровня, гарантируется ГУИ, согласно которому полный идентификатор строится как конкатенация префикса категории и локального имени ($P:adm_db_01$, $Soft:pgsql_v14$); $E(t)$ – множество ребер определяется как подмножество декартова произведения вершин:

$$E(t) \subseteq V(t) \times V(t),$$

каждое ребро $e = (u, v) \in E(t)$ соединяет вершину-источник u с вершиной-целью v ; типизация связей реализуется через функцию атрибутов prop ; для каждого ребра e определен обязательный атрибут ‘type’ со значением из фиксированного словаря типов Γ :

$$\forall e \in E(t): \text{prop}(e, 'type') \in \Gamma,$$

на основе значений этого атрибута и принадлежности вершин уровням множество $E(t)$ семантически разбивается на внутриуровневые ребра $E_{internal}(t)$, связывающие вершины одного уровня ($\ell_u = \ell_v$), и межуровневые $E_{cross}(t)$, связывающие вершины разных уровней ($\ell_u \neq \ell_v$); функция атрибутов prop

является частичной функцией, определенной на парах «элемент–имя атрибута» и принимающей значения из конечных доменов:

$$\text{prop}: (V(t) \cup E(t)) \times K \rightarrow \bigcup_{k \in K} \text{Dom}_k,$$

где K – множество имен атрибутов из онтологии \mathcal{O} ; Dom_k – конечный домен значений атрибута k , например, $\text{Dom}_{competence} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $\text{Dom}_{load} = \{0, 1, \dots, 100\}$, $\text{Dom}_{status} = \{\text{«работает»}, \text{«остановлен»}, \text{«сбой»}\}$, $\text{Dom}_{finance} = \{1, \dots, M\}$.

Следовательно, полное пространство состояний:

$$S = \{s(t) = (V(t), E(t), \text{prop}) \mid t \in T\}.$$

Приведем содержательные характеристики каждого уровня ИС.

2.3. Обеспечивающий уровень (Ens)

Ens – источник законодательных требований и финансирования для всех нижележащих уровней.

Формально: вершины уровня Ens – элементы множества $V_{Ens}(t) = \{v = (Ens, \sigma) \mid v \in V(t)\} \subset V(t)$.

Пример: «Политика ИБ v1.2» \leftrightarrow вершина $v = (Ens, policy_ib_v1.2) \in V_{Ens}(t)$.

Типичные вершины (практические примеры): «Бюджет ИБ» $\leftrightarrow v_{budget} = (Ens, budget_ib_2025)$, «Политика ФСТЭК №117» $\leftrightarrow v_{fsk} = (Ens, fsk_117)$.

Типичные атрибуты (prop):

$$\text{prop}(v_{budget}, value) = 5\,000\,000,$$

$$\text{prop}(v_{budget}, currency) = \text{«RUB»},$$

$$\text{prop}(v_{fsk}, type) = \text{«документ»},$$

$$\text{prop}(v_{fsk}, name) = \text{«ФСТЭК №117»},$$

$$\text{prop}(v_{fsk}, effective_date) = \text{«2026-03-01»}.$$

Для удобства представления совокупности атрибутов вершины v далее используется сокращенная запись:

$$\text{prop}(v) = \{k_1 = v_1, k_2 = v_2, \dots\},$$

которая обозначает набор значений функции $\text{prop}(v, k)$ для всех $k \in K$, определенных на v .

Примеры:

$$\text{prop}(v_{budget}) = \{type = \text{«финансы»}, value = 5\,000\,000, currency = \text{«RUB»}\},$$

$$\text{prop}(v_{fsk}) = \{type = \text{«документ»}, name = \text{«ФСТЭК №117»}, effective_date = \text{«2026-03-01»}\}.$$

2.4. Уровень персонала (P)

Уровень персонала (кадровый уровень) включает кадры, их компетенции и структура, человеческий интерфейс реализации замысла.

⁸ ISO/IEC 27001 A.7–A.8, COBIT Technology

Формально: вершины уровня P – элементы множества $V_P(t) = \{v = (P, \sigma) \mid v \in V(t)\}$.

Типичные вершины: «Администратор СУБД» $\leftrightarrow v_{adm} = (P, adm_db_01) \in V_P(t)$, «Роль: Специалист по SIEM» $\leftrightarrow v_{role} = (P, role_siem)$.

Типичные атрибуты:

$prop(v_{adm}) = \{type = \text{«сотрудник»}, competence = 4, load = 0,7\}$,

$prop(v_{role}) = \{type = \text{«роль»}, required_competence = 4, criticality = \text{«высокая»}\}$.

2.5. Аппаратный уровень ($Hard$, АО)

Аппаратный уровень (АО) содержит физические ресурсы: серверы, сети, хранилища, среду для исполнения программного обеспечения (ПО).

Формально: вершины уровня $Hard$ – элементы $V_{Hard}(t) = \{v = (Hard, \sigma) \mid v \in V(t)\}$.

Типичные вершины:

«Сервер СУБД» $\leftrightarrow v_{srv} = (Hard, srv_db_01) \in V_{Hard}(t)$, «Канал связи 10 Гбит/с» $\leftrightarrow v_{link} = (Hard, link_10g)$.

Типичные атрибуты:

$prop(v_{srv}) = \{type = \text{«сервер»}, cpu_cores = 32, memory_gb = 256, status = \text{«работает»}\}$,

$prop(v_{link}) = \{type = \text{«канал»}, bandwidth_mbps = 10000\}$.

2.6. Программный уровень ($Soft$, ПО) описывает все программные компоненты и их зависимости, результат работы ИС.

Формально: вершины уровня $Soft$ – элементы $V_{Soft}(t) = \{v = (Soft, \sigma) \mid v \in V(t)\}$.

Типичные вершины:

«СУБД PostgreSQL» $\leftrightarrow v_{db} = (Soft, pgsql_v14) \in V_{Soft}(t)$, «SIEM-сервер» $\leftrightarrow v_{siem} = (Soft, siem_v2.1)$.

Типичные атрибуты:

$prop(v_{db}) = \{type = \text{«сервис»}, name = \text{«PostgreSQL»}, version = \text{«14,5»}, status = \text{«работает»}\}$,
 $prop(v_{siem}) = \{type = \text{«сервис»}, resource_demand = \{cpu: 5, storage: 20\}\}$.

2.7. Иерархия как направленное влияние

Иерархия в ONYX проявляется не в изолированности уровней, а в направленности межуровневых связей и семантике правил валидности.

Ребро типа «администрирует»:

от $v_{adm} \in V_P(t)$ к $v_{db} \in V_{Soft}(t)$.

Ребро типа «размещает»:

от $v_{srv} \in V_{Hard}(t)$ к $v_{db} \in V_{Soft}(t)$.

Ребро типа «финансирует»:

от $v_{budget} \in V_{Ens}(t)$ к $v_{srv} \in V_{Hard}(t)$.

Таким образом реализуется цепочка замысла:

Замысел (Ens) \rightarrow Исполнитель (P) \rightarrow Среда ($Hard$) \rightarrow Результат ($Soft$).

Нарушение на любом этапе – признак отклонения от целевого замысла, даже если система продолжает функционировать. Отслеживание соответствия замыслу и позволяет ONYX обеспечивать упреждающее управление.

Чтобы отличить все теоретически возможные состояния ИС от физически допустимых, вводится предикат валидности:

$IsValid: s \rightarrow \{true, false\}$,

определяющий подмножество допустимых состояний: $S_{valid} = \{s \in S \mid IsValid(s) = true\}$.

3. Предикаты валидности $IsValid(s)$ и легитимности $IsIntended(s)$ на основе логики первого порядка

Предикат валидности $IsValid(s)$ формализует условия целостности и физической реализуемости модели: состояние s валидно, если граф синтаксически корректен и соблюдены зависимости, например, каждый программный компонент имеет аппаратную платформу. Нарушение $IsValid(s)$ делает адаптацию некорректной.

Предикат легитимности $IsIntended(s)$ формализует штатные (легитимные) состояния системы.

$IsValid$ и $IsIntended$ задаются как конъюнкция правил в логике первого порядка (FOL).

3.1. Универсум и базовые предикаты

Универсум рассуждений – это конечное множество всех элементов модели:

$M_{ONYX} = V(t) \cup E(t)$.

Все переменные в формулах явно типизируются: v, u, \dots обозначают вершины ($v \in V(t)$), e, f, \dots обозначают ребра ($e \in E(t)$). Соответственно, кванторы в правилах всегда имеют подразумеваемый тип: $\forall v$ означает $\forall v \in V(t)$, $\exists e$ означает $\exists e \in E(t)$. Это гарантирует, что предикаты вроде $Level(v, P)$ или $Source(e, v)$ применяются только к аргументам корректных типов, что исключает синтаксически некорректные формулы.

Предикаты и функции модели:

- $Level(x, \ell)$ – предикат, определенный только для вершин $x \in V(t)$, истинный тогда и только тогда, когда вершина x принадлежит уровню $\ell \in \mathcal{L}$;
- $Source(e, v)$, $Target(e, u)$ связывают ребро $e \in E(t)$ с его исходной и целевой вершинами $v, u \in V(t)$.

Функция атрибутов. Для любого элемента $x \in V(t) \cup E(t)$ и любого ключа атрибута $k \in K$ значение атрибута определяется частичной функцией $prop(x, k) \in Dom_k$. Функция является единственным механизмом доступа к атрибутивной информации модели.

Различие между внутриуровневыми и межуровневыми связями выражается через предикат *Level*: ребро e является межуровневым, если:

$$\exists v, u, \ell_1, \ell_2 (\text{Source}(e, v) \wedge \text{Target}(e, u) \wedge \text{Level}(v, \ell_1) \wedge \text{Level}(u, \ell_2) \wedge \ell_1 \neq \ell_2).$$

Формальное определение. Предикат валидности определяется как конечная конъюнкция замкнутых формул из разрешимого фрагмента логики первого порядка, основанного на конъюнктивных запросах (CQ, *аббр. от англ.* Conjunctive Queries) и включающего Tuple-Generating Dependencies (TGD) и Equality-Generating Dependencies (EGD):

$$\text{IsValid}(s) \equiv \bigwedge_{i=1}^n \text{Rule}_i(s),$$

где каждое $\text{Rule}_i(s)$ является замкнутой формулой вида:

$$\forall \vec{x} (\phi(\vec{x}) \rightarrow \exists \vec{y} \psi(\vec{x}, \vec{y})), \text{ класс TGD},$$

$$\forall \vec{x} (\phi(\vec{x}) \rightarrow x_1 = x_2), \text{ класс EGD},$$

где ϕ и ψ – CQ над предикатами модели.

Предикат $\text{IsIntended}(s)$ определяется аналогично.

Проверка предикатов $\text{IsValid}(s)$ и $\text{IsIntended}(s)$ обладает сложностью *LOGSPACE* по данным (*Data Complexity*), то есть потребление памяти растет полилогарифмически при фиксированном наборе правил и растущем размере графа системы [20]. Это гарантирует масштабируемость метода для промышленных ИС высокой размерности. В общем случае (*Combined Complexity*) сложность определяется выразительной силой выбранного фрагмента логики, для рассматриваемого класса TGD без циклов зависимости она остается полиномиальной.

Примечание. Расширение логического базиса. Для работы с параметрическими атрибутами (пропускная способность, загрузка CPU) множество допустимых атомов в формулах $\text{Rule}_i(s)$ дополняется встроенными предикатами сравнения (*Built-in Predicates*) $\bowtie \in \{<, \leq, >, \geq, =\}$ над доменами значений атрибутов. Поскольку согласно п. 2.2 все домены Dom_k конечны, введение арифметических сравнений не выводит задачу проверки валидности за пределы класса сложности *LOGSPACE* (*Data Complexity*).

Примеры правил. Пусть в онтологии задано правило зависимости: «Любой компонент типа *service* на уровне *Soft* с атрибутом *criticality = high* должен управляться субъектом на уровне *P*, обладающим *competence* ≥ 4 ».

Формально это выражается как схема:

$$\forall v (\text{Level}(v, \ell_1) \wedge \text{Type}(v, t) \wedge \text{prop}(v, k) = v_k \rightarrow \rightarrow \exists u \exists e (\text{Level}(u, \ell_2) \wedge \text{EdgeType}(e, \tau) \wedge \text{Source}(e, u) \wedge \text{Target}(e, v) \wedge \text{prop}(u, k') \bowtie \theta)),$$

где $\ell_1, \ell_2, t, \tau, k, v_k, k', \bowtie, \theta$ – параметры правила, заданные не коде, а в метаописании правила.

После подстановки правило выглядит так:

$$\forall v (\text{Level}(v, \text{Soft}) \wedge \text{Type}(v, \text{service}) \wedge \text{prop}(v, \text{criticality}) = \text{high}) \rightarrow \exists u \exists e \exists c (\text{Level}(u, P) \wedge \text{EdgeType}(e, \text{администрирует}) \wedge \text{Source}(e, u) \wedge \text{Target}(e, v) \wedge \text{prop}(u, \text{competence}) = c \wedge (c = 4 \vee c = 5)).$$

Пояснение подстановки:

$\ell_1 = \text{Soft}$ – программный уровень;

$\ell_2 = P$ – уровень персонала;

$\tau = \text{администрирует}$ – тип межуровневой связи (значение $\text{prop}(e, \text{'type'})$);

$t = \text{service}$ – тип вершины (значение $\text{prop}(v, \text{'type'})$);

$k = \text{criticality}$, $v_k = \text{high}$ – ключ и значение атрибута, определяемые равенством $\text{prop}(v, k) = v_k$; неравенство в правой части $\text{prop}(u, k') \geq \theta$ проверяет, что значение компетенции администратора (атрибут $k' = \text{competence}$) не ниже требуемого порога $\theta = 4$.

Таким образом, правила становятся шаблонами, применимыми к любой паре уровней и типов, описанных в онтологии.

В модели ONYX важно различать синтаксис формул и топологию графа. Прямая запись вида $\text{Source}(v, v)$ невозможна, так как это является ошибкой типов: первый аргумент предиката обязан быть ребром, а не вершиной. Однако структурные петли допустимы: они моделируются через существование ребра e , которое одновременно выходит из вершины и входит в нее, то есть истинны оба предиката: $\text{Source}(e, v)$ и $\text{Target}(e, v)$. Такие петли легитимны, если тип связи e семантически допускает рефлексивность, например, «самодиагностика» или «внутренний цикл».

3.2. Декомпозиция пространства валидных состояний

Для классификации ситуаций внутри множества валидных (физически реализуемых) состояний S_{valid} вводятся дополнительные целевые предикаты:

- $P_{\text{realizable}}(s) \equiv \text{IsValid}(s)$ проверяет физическую и логическую возможность существования состояния, например, «ПО не может существовать без АО»;
- $P_{\text{compliant}}(s)$ – соответствие политикам и регламентам;
- $P_{\text{target}}(s)$ – соответствие целевому архитектурному замыслу, например, наличие резерва для критического сервиса.

Предикаты связаны между собой так:

$$\text{IsIntended}(s) = \text{IsValid}(s) \wedge P_{\text{compliant}}(s) \wedge P_{\text{target}}(s).$$

На основе предикатов вводится разбиение:

$$S_{\text{valid}} = S_{\text{intended}} \cup S_{\text{incident}}, S_{\text{intended}} \cap S_{\text{incident}} = \emptyset,$$

где $S_{intended}$ – штатные (легитимные) состояния, система физически возможна, безопасна и соответствует проекту:

$$S_{intended} = \{s \in S_{valid} \mid P_{compliant}(s) \wedge P_{target}(s)\};$$

($S_{incident}$) – инцидентные состояния, система функционирует, но нарушены политики или архитектурные требования:

$$S_{incident} = \{s \in S_{valid} \mid \neg(P_{compliant}(s) \wedge P_{target}(s))\}.$$

Таким образом, ИБ в модели ОНУХ – это не обязательно нарушение доступности, целостности или конфиденциальности в классическом понимании, а любое событие, в результате которого ИС переходит из подмножества штатных состояний $S_{intended}$ в подмножество инцидентных состояний $S_{incident}$ (критический сервис не имеет назначенного резервного администратора; политика безопасности требует двухфакторной аутентификации, но она отключена для подгруппы пользователей без формального исключения; документация по эксплуатации устарела, хотя система функционирует).

Поскольку $S_{valid} = S_{intended} \cup S_{incident}$, и $IsValid(s) \equiv P_{realizable}(s)$, то нарушение $P_{realizable}$ означает выход за пределы моделируемой реальности (невалидное состояние), тогда как нарушение $P_{compliant}$ или P_{target} является триггером для адаптивного управления.

4. Оператор управления R

4.1. Дестабилизирующие факторы (ДФ) и их влияние на модель

Пусть \mathcal{D} – множество всех возможных ДФ. Каждому фактору $d \in \mathcal{D}$ сопоставляется частичный оператор трансформации состояния $F_d: S \rightarrow S$, переводящий систему из состояния s в возмущенное состояние $s' = F_d(s)$.

Множество \mathcal{D} классифицируется по типу воздействия на граф $G = (V, E, \text{prop})$:

Структурные факторы (\mathcal{D}_{struct}): изменяют топологию, то есть $(V', E') \neq (V, E)$. *Примеры:* физический выход из строя сервера (удаление вершины $v \in V_{Hard}$), разрыв канала связи (удаление ребра $e \in E_{cross}$), увольнение сотрудника (удаление $v \in V_P$).

Параметрические факторы (\mathcal{D}_{par}): сохраняют топологию, но изменяют атрибуты: $(V', E') = (V, E)$ и $\exists x, k: \text{prop}'(x, k) \neq \text{prop}(x, k)$. *Примеры:* снижение пропускной способности канала (атрибут *bandwidth*), устаревание версии ПО (атрибут *actual_version*), снижение эффективности сотрудника (атрибут *competence*).

Смешанные факторы: затрагивают и структуру, и параметры.

По природе ДФ: $\mathcal{D} = \mathcal{D}_{det} \cup \mathcal{D}_{st} \cup \mathcal{D}_{unc}$,

где \mathcal{D}_{det} (детерминированные) – плановые изменения с известным результатом; \mathcal{D}_{st} (стохастические) – сбои / отказы с известным распределением вероятностей; \mathcal{D}_{unc} (неопределенные) – воздействия, модель которых априорно неизвестна или неприменима (новые уязвимости, целенаправленные атаки [21]).

Определение. X-возмущением в модели – фактор $d \in \mathcal{D}$, действие которого сохраняет физическую реализуемость состояния, но увеличивает отклонение от целевого архитектурного замысла относительно некоторой метрики μ :

$$X = \{d \in \mathcal{D} \mid \exists s \in S_{valid}: F_d(s) \in S_{incident} \wedge \mu(F_d(s)) > \mu(s)\}.$$

Этот ДФ нарушает целевой замысел, но не выводит систему за пределы S_{valid} , следовательно, к X-возмущению применимы методы адаптивного управления [22]. Оператор R реагирует непосредственно на отклонение состояния $s \rightarrow s'$, без идентификации фактора d . Модели безразлично, была ли связь разорвана экскаватором или хакером – важно, что ребро исчезло или его параметр *bandwidth* упал ниже порога.

4.2. Определение оператора управления R

Оператор управления R – ключевой компонент ОНУХ, задающий динамику переходов между состояниями системы и обеспечивающий адаптивную самонастройку системы. Его задача – генерировать структурно корректные изменения, удерживающие систему в S_{valid} и возвращающие ее в $S_{intended}$. Вместо вычислительно неразрешимого перебора всех трансформаций R синтезирует управляющие воздействия на основе конечной базы верифицированных шаблонов \mathcal{P} .

Определение. База шаблонов $\mathcal{P} = \{\pi_1, \dots, \pi_m\}$ – это конечное множество параметризованных правил трансформации графа, где каждый шаблон π_k определяет:

- предусловие (Precondition): структурный паттерн графа, соответствующий определенному типу инцидента, например, «Узел типа Сервис не имеет связи с узлом типа Сотрудник»;
- действие (Action): последовательность элементарных операций π , устраняющих этот дефицит, например, «Создать ребро, связывающее Сервис с Сотрудником из пула резерва».

Набор изменений π определяется как упорядоченная последовательность элементарных операций из конечного множества Ω_{op} :

$$\pi = \langle \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k \rangle, \text{ где } \omega_i \in \Omega_{op}.$$

Множество Ω_{op} включает следующие операции: *add_vertex(id, attrs)* добавляет новую вершину с идентификатором *id* и атрибутами *attrs*; *del_vertex(id)* удаляет вершину *id* и все инцидентные ей ребра;

$add_edge(u, v, type)$ добавляет ориентированное ребро от u к v с типом связи $type$;
 $del_edge(u, v, type)$ удаляет ребро указанного типа между u и v ;
 $update_attr(id, key, value)$ обновляет значение атрибута key у элемента id на значение $value$.

Обозначим через ΔS множество всех конечных последовательностей операций из Ω_{op} :

$$\Delta S \stackrel{\text{def}}{=} \Omega_{op}^*$$

Элемент $\pi \in \Delta S$ называется траекторией управления.

Функция $Apply(s, \pi)$ последовательно применяет операции ω_i к графу состояния s . Каждая операция считается применимой, только если выполнены ее предусловия, например, удаляемая вершина существует, добавляемое ребро отсутствует и т. п. Если предусловие нарушено, последовательность π считается неприменимой.

Множество ΔS , упоминаемое в алгоритме ниже, – это множество всех конечных последовательностей операций из Ω_{op} , включая пустую, применимых хотя бы к одному состоянию $s \in S$.

Алгоритм работы оператора R представляет из себя определенную последовательность шагов.

Шаг 1. Диагностика: выявление подграфа $G_{defect} \subset G$, нарушающего условия соответствия замыслу или валидности.

Шаг 2. Поиск шаблонов (Matching): из базы \mathcal{P} выбираются шаблоны, чьи предусловия соответствуют G_{defect} .

Шаг 3. Инстанцирование (Instantiation): для каждого подходящего шаблона генерируется конкретный набор изменений $\pi_i \in \Delta S$, где абстрактные параметры заменяются на идентификаторы реальных узлов, например, выбирается конкретный сотрудник «Иванов» с подходящими атрибутами.

Шаг 4. Верификация, для каждого сгенерированного набора изменений π_i выполняются следующие проверки:

– применимость: все операции из π_i могут быть выполнены над текущим состоянием s , например, удаляемая вершина существует, добавляемое ребро отсутствует;

– валидность результата: новое состояние $s' = Apply(s, \pi_i)$ удовлетворяет предикату $IsValid(s') = true$;

– проверяется условие прогресса: новое состояние $s' = Apply(s, \pi_i)$ должно быть строго ближе к целевому подмножеству $S_{intended}$, чем исходное s согласно некоторой метрике μ .

Например, суммарное число правил политик $P_{compliant}$ и условий целевого замысла P_{target} , нарушаемых в состоянии s :

$$\mu(s) = |\{r \in P_{target} \cup P_{compliant} \mid \neg Rule_r(s)\}|.$$

Если подходящий шаблон не найден, или ни один из кандидатов не прошел верификацию, например, нет свободных сотрудников, оператор возвращает исходное состояние s и генерирует сигнал эскалации для вмешательства человека-оператора. Применяется любой π_i , для которого $\mu(s') < \mu(s)$, например, первый кандидат. Это гарантирует отсутствие закливания при итеративном применении оператора R .

Применение: выбирается первый валидный набор π_i , и состояние системы обновляется: $s \leftarrow s'$.

Ключевым требованием к автоматизированной системе управления ИС является гарантия того, что управляющее воздействие не приведет к деградации системы или нарушению политик безопасности. В модели ONYX это обеспечивается конструктивно.

Утверждение 1. Инвариантность валидности (от англ. Safety Invariant)

Пусть \mathcal{P} – база корректных шаблонов, такая что:

$$\forall \pi \in \mathcal{P}: IsValid(s) \wedge Pre(\pi, s) \Rightarrow IsValid(Apply(s, \pi)),$$

где $Pre(\pi, s)$ – предикат, истинный в том случае, если к состоянию s применимы предусловия шаблона π (см. алгоритм поиска шаблонов в п. 4.2).

Тогда оператор R сохраняет инвариант валидности:

$$s \in S_{valid} \Rightarrow R(s) \in S_{valid}.$$

Доказательство. Алгоритм R конструктивно ограничивает пространство выбора ΔS только подмножеством тех трансформаций из \mathcal{P} , пост-условия которых удовлетворяют предикату $IsValid$.

1) Множество кандидатов \mathcal{P} конечно (по условию).

2) Применение каждого шаблона $\pi \in \mathcal{P}$ дает конкретное состояние:

$$s' = Apply(s, \pi),$$

3) Предикат $IsValid$ разрешим (в модели ONYX проверяется за полиномиальное время), поэтому алгоритм R всегда завершится одним из результатов:

- $s' \in S_{valid}$ (если найден подходящий шаблон);
- s (если подходящих шаблонов нет).

Таким образом, $\forall s \in S_{valid}: R(s) \in S_{valid}$, то есть S_{valid} замкнуто относительно R , что гарантирует структурную корректность и внутреннюю согласованность всех управляющих воздействий.

Утверждение 2. \mathcal{P} -полнота восстановления (от англ. Relative Completeness)

Оператор R является полным относительно базы знаний \mathcal{P} : если существует траектория восстановления, представляемая как композиция шаблонов из \mathcal{P} , то R найдет ее или эквивалентную по метрике μ за конечное число шагов.

Обоснование. Алгоритм R осуществляет полный перебор всех шаблонов из конечной базы P , их инстанцирование и верификацию. Если решение существует и охвачено базой знаний, оно будет найдено и применено. Таким образом, достижимость целевого состояния обеспечивается при достаточности базы шаблонов, что соответствует прагматическому подходу к автоматизации управления.

4.3. Концепция X -адаптивности

Модель ONYX реализует упреждающее управление.

Определение. Упреждающее управление – это режим функционирования системы, при котором оператор R инициирует корректирующие воздействия для любого валидного инцидентного состояния $s \in S_{incident} \subset S_{valid}$, характеризуемого ненулевым отклонением от целевого архитектурного замысла относительно некоторой метрики μ , то есть $\mu(s) > 0$.

Пример: отсутствие резервного администратора для критического сервиса не нарушает $P_{compliant}$, но нарушает P_{target} ; состояние переходит в $S_{incident}$, что запускает R для назначения нового администратора до наступления критического сбоя; метрика μ – число нарушенных предикатов.

Переход в состояние $s \notin S_{valid}$ означает выход за пределы штатного режима функционирования модели ONYX, то есть характеризует ситуацию, когда упреждающее управление не отработало, и требует аварийного вмешательства, не охватываемого оператором R .

Традиционные методы управления разделяют робастность как устойчивость системы к малым параметрическим возмущениям при фиксированной структуре и структурную адаптацию как изменение топологии по заранее заданным правилам. Однако в условиях кибервойны и гибридных угроз ДФ из множества X может одновременно нарушать параметры и структуру системы, причем его природа заранее неизвестна. В отличие от классических подходов, X -адаптивность обеспечивает восстановление при таких неопределенных структурно-параметрических воздействиях.

Определение. Граф переходов состояний

Пусть Ω_{op} – множество элементарных операций системы.

Определим ориентированный граф:

$$\mathcal{G} = (S_{valid}, \mathcal{E}),$$

где S_{valid} – множество вершин (допустимых состояний); $\mathcal{E} \subseteq S_{valid} \times S_{valid}$ – множество дуг, таких что:

$$(s_i, s_j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow \exists \omega \in \Omega_{op}: s_j = \text{Apply}(s_i, \omega).$$

Определение. X -адаптивность

Система называется X -адаптивной, если для любого инцидентного состояния $s \in S_{incident}$ в графе \mathcal{G} существует путь в целевое множество $S_{intended}$:

$$\forall s \in S_{incident}, \exists s^* \in S_{intended}, \exists \pi \in \Omega_{op}^*: \text{Apply}(s, \pi) = s^*,$$

где $\pi = \langle \omega_1, \dots, \omega_k \rangle$ – это траектория восстановления, то есть последовательность операций из Ω_{op} .

Примечание. Допустимые трансформации Ω_{op}^* включают и структурные (изменение топологии), и параметрические (изменение атрибутов) операции.

Физический смысл: X -адаптивность – это свойство архитектуры (пространства состояний), гарантирующее, что для любого инцидента существует хотя бы один допустимый путь восстановления; это свойство не зависит от полноты базы шаблонов \mathcal{P} или природы ДФ.

Критерий X -адаптивности. Для формулировки критерия введем понятие Области притяжения (от англ. Attraction Basin):

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^{-1}(S_{intended}) &= \\ &= \{s \in S_{valid} \mid \exists s^* \in S_{intended}: \text{Reachable}_{\mathcal{G}}(s, s^*)\}. \end{aligned}$$

Теорема 1. О критерии существования решения (необходимое и достаточное условие)

ИС является X -адаптивной тогда и только тогда, когда множество инцидентных состояний является подмножеством области притяжения целевого множества:

$$S_{incident} \subseteq \mathcal{R}^{-1}(S_{intended}).$$

Доказательство:

– необходимость (\Rightarrow): по определению X -адаптивности для любого $s \in S_{incident}$ существует путь в $S_{intended}$; следовательно, каждый такой s обязан принадлежать множеству $\mathcal{R}^{-1}(S_{intended})$; если бы $s \in S_{incident}$, где s такое, что $s \notin \mathcal{R}^{-1}(S_{intended})$, то из него было бы невозможно восстановить систему, что противоречит определению;

– достаточность (\Leftarrow): в случае если $S_{incident} \subseteq \mathcal{R}^{-1}(S_{intended})$, то по построению множества \mathcal{R}^{-1} для каждого инцидента гарантированно существует валидная траектория восстановления.

Теорема 1 определяет топологические требования к пространству состояний, допускающие последовательное восстановление.

Требование 1. Локальное требование (отсутствие тупиков / Deadlock Freedom): в графе \mathcal{G} не должно быть состояний $s \in S_{incident}$, из которых не исходит ни одной дуги допустимого перехода. Физически это означает, что в любой ситуации, даже если целевой замысел нарушен, у системы должна оставаться возможность совершить валидный переход ($s \rightarrow s'$), где $s' \in S_{valid}$. При этом новое состояние s' может оставаться инцидентным, если полное восстановление за один шаг невозможно.

Требование 2. Глобальное требование (Отсутствие циклов / Livelock Freedom): последовательность локальных переходов должна формировать нециклическую траекторию, ведущую к выходу из множества $S_{incident}$ в $S_{intended}$. Недопустима ситуация, когда система бесконечно блуждает внутри множества инцидентных состояний (меняет структуру или параметры, оставаясь в $S_{incident}$), не имея возможности достичь целевого множества.

Связь X -адаптивности и реализации управления. Теорема 1 характеризует структурную возможность восстановления в графе \mathcal{G} . Но оператор R оперирует не всем графом допустимых переходов, а ограниченным набором знаний – базой шаблонов \mathcal{P} .

Определение \mathcal{P} -покрытия. База шаблонов \mathcal{P} называется полной относительно $S_{incident}$, если любой теоретически существующий путь восстановления π может быть получен путем инстанцирования некоторого шаблона из \mathcal{P} .

Теорема 2. Об условии разрешимости восстановления

Задача автоматического восстановления разрешима оператором R тогда и только тогда, когда выполняются два условия:

- 1) система X -адаптивна (структурное условие): $S_{incident} \subseteq \mathcal{R}^{-1}(S_{intended})$;
- 2) база шаблонов \mathcal{P} полна относительно $S_{incident}$ (информационное условие).

Доказательство:

– достаточность (\Leftarrow): пусть выполнены условия 1 и 2; докажем, что оператор R успешно переведет систему в $S_{intended}$;

– необходимость (\Rightarrow): пусть оператор R гарантированно решает задачу восстановления для любого $s \in S_{incident}$; докажем, что условия 1 и 2 выполняются.

Рассмотрим произвольное инцидентное состояние $s_0 \in S_{incident}$. Так как выполнено условие X -адаптивности (1), граф переходов \mathcal{G} содержит хотя бы один путь $\pi_{exist} \in \Omega_{op}^*$, ведущий из s_0 в некоторое целевое состояние $s^* \in S_{intended}$, такой, что все промежуточные состояния валидны. Так как выполнено условие Полноты \mathcal{P} (2), для существующего пути π_{exist} в базе знаний найдется шаблон $p \in \mathcal{P}$, инстанцирование которого порождает траекторию π_R , эквивалентную π_{exist} , или саму π_{exist} .

Согласно алгоритму работы оператора R (раздел 4.2), на шагах «Поиск шаблонов» и «Инстанцирование» производится полный перебор допустимых применений шаблонов из \mathcal{P} . Следовательно, траектория π_R будет сгенерирована как один из кандидатов.

На этапе «Верификация» траектория π_R будет проверена на валидность:

$$(\text{IsValid}(\text{Apply}(s_0, \pi_R))) = \text{true}$$

и на прогресс по метрике μ .

Поскольку π_R ведет к цели (где $\mu = 0$), условие прогресса выполняется. Следовательно, оператор R выберет и применит эту траекторию или другую, также ведущую в $S_{intended}$. В виду того, что целевое состояние $s^* \in S_{intended}$ характеризуется отсутствием нарушений ($\mu(s^*) = 0$), условие строгого улучшения метрики $\mu(s^*) < \mu(s_0)$ выполняется автоматически, так как $\mu(s_0) > 0$.

Вывод: задача восстановления разрешима.

В интересах доказательства необходимости условия 1 (X -адаптивность) предположим обратное: оператор R работает успешно, но система не является X -адаптивной. Это означает, что существует состояние $s_{bad} \in S_{incident}$, из которого в графе \mathcal{G} нет физического пути в $S_{intended}$, то есть s_{bad} – тупиковое состояние или изолированная компонента.

Оператор R генерирует только структурно корректные изменения, соответствующие дугам графа \mathcal{G} . Если пути в графе не существует, R не может его синтезировать траекторию восстановления, не нарушив валидность модели (предикат IsValid). Следовательно, $R(s_{bad})$ не достигнет цели, что противоречит условию успешности R .

Противоречие: значит, система обязана быть X -адаптивной.

В интересах доказательства необходимости условия 2 (Полнота \mathcal{P}) предположим обратное: оператор R работает успешно, система X -адаптивна (путь существует), но база \mathcal{P} не полна. Это означает, что существует состояние $s \in S_{incident}$ и путь восстановления π , но в базе \mathcal{P} нет шаблона, способного породить этот путь π или любой альтернативный путь к цели.

Оператор R работает только путем инстанцирования шаблонов из \mathcal{P} . Если нужного шаблона нет, множество кандидатов на шаге «Инстанцирование» не будет содержать решения, ведущего в $S_{intended}$. Оператор вернет исходное состояние s или выполнит частичное улучшение и застрянет в локальном минимуме, не достигнув цели. Это противоречит условию, что R решает задачу.

Противоречие: значит, база \mathcal{P} обязана быть полной.

Заключение. Теорема доказана полностью. Условия структурной связности и информационной полноты являются необходимыми и достаточными для алгоритмической разрешимости задачи.

Отметим следующие особенности подхода:

- инвариантность к источнику (управляющее воздействие формируется на основе анализа графа \mathcal{G} , а не на основе идентификации причины сбоя);
- многовариантность (возврат осуществляется в любое достижимое состояние из $S_{intended}$);
- гарантия адаптации (возможность восстановления обеспечивается наличием структурно разре-

шенных путей в графе, существование которых постулируется свойством X -адаптивности);

– кросс-уровневая восстанавливаемость (связность графа G позволяет решать проблему на одном уровне средствами других (функциональная избыточность)).

Таким образом, X -адаптивность является строгим системным свойством, гарантирующим принципиальную возможность нейтрализации дестабилизирующих факторов произвольной природы.

4.4. Свойства оператора R

На основе доказанных утверждений и алгоритмической структуры оператор R обладает определенными формальными свойствами.

1) Безопасность (*Safety*): оператор сохраняет инвариант валидности (Утверждения 1).

2) Относительная полнота (*\mathcal{P} -Completeness*): если существует целевое состояние $s^* \in S_{intended}$, достижимое через композицию шаблонов из \mathcal{P} , то оператор найдет соответствующую траекторию (Утверждения 2).

3) Завершаемость (*Termination*): каждый вызов R завершается за конечное число шагов.

4) Строгая монотонность сходимости (*Strict Monotonicity*): для любого успешного управляющего воздействия выполняется условие строгого уменьшения метрики отклонения, математически гарантирует отсутствие заикливания (*livelock*) в процессе адаптации:

$$R(s) \neq s \implies \mu(R(s)) < \mu(s).$$

5) Идемпотентность в целевом множестве: если система уже находится в штатном состоянии, оператор не вносит изменений.

6) Иерархическая согласованность: все генерируемые изменения топологически корректны относительно НОР, учитывая направленность влияния между уровнями.

Это соответствует парадигме «fail-safe»: в худшем случае, если решение не найдено в базе \mathcal{P} , то система остается в исходном инцидентном состоянии $R(s) = s$ и инициирует эскалацию, но никогда не переходит в невалидное или хаотическое состояние.

Все изменения строго регламентированы: вертикальные воздействия (назначение прав) идут сверху вниз, горизонтальные – внутри уровня.

4.5. Аналитические следствия: иерархия как фактор уязвимости и защиты

Формальная структура модели ONYX позволяет строго доказать два фундаментальных свойства, характеризующих природу современных гибридных угроз.

Следствие 1. Эффект «Конуса влияния» (*Cone of Influence*)

В силу транзитивности управляющих связей в иерархии ($Ens \rightarrow P \rightarrow Hard \rightarrow Soft$) мощность атаки $Power(v)$, определяемая как множество вершин, достижимых из захваченного узла v , монотонно возрастает с повышением уровня иерархии.

Атакующий, скомпрометировавший узел на уровне *Soft*, например, *SQL*-инъекция, ограничен рамками программной среды. Напротив, атакующий на уровне *Ens*, например, изменение бюджетной политики, инициирует каскадные изменения на всех нижележащих уровнях. Таким образом, уровень иерархии выступает мультипликатором ущерба: захват управления (*Ens*, *P*) всегда опаснее захвата исполнения (*Hard*, *Soft*).

Следствие 2. Принцип уровневой нейтрализации

Модель разграничивает понятия компенсации и нейтрализации:

– компенсация (обеспечение живучести) возможна средствами нижестоящих уровней (например, при отказе оборудования (*Hard*) программный уровень (*Soft*) может снизить нагрузку, сохранив валидность системы ($s \in S_{valid}$), но не устранив причину сбоя);

– нейтрализация (восстановление исходной структуры) возможна только средствами того же или более высокого уровня (в силу иерархичности нижестоящий уровень не имеет управляющих связей к вышестоящему; следовательно, дефект уровня ℓ_i не может быть исправлен командой с уровня ℓ_{i+k}).

Анализ кейса. Социальная инженерия как атака «Вертикальной инъекции»

В контексте ONYX социальная инженерия представляет собой атаку, эксплуатирующую свойство иерархического доверия. Злоумышленник атакует уровень P (персонал), получая контроль над узлом v_{admin} , обладающим легитимными правами управления подграфом $G_{sub} \subset (Hard \cup Soft)$. Технические средства защиты уровней *Hard* и *Soft* конструктивно не способны нейтрализовать такую атаку, так как согласно предикату *IsValid* команды от v_{admin} являются валидными.

Из модели ONYX следует, что парирование такой угрозы возможно исключительно горизонтально (на уровне P) или вертикально (с уровня *Ens*): соответственно, введением топологических ограничений вида «правило двух ключей» (подтверждение действия двумя независимыми узлами P) или изменением мета-политик, блокирующих определенные типы транзакций для всех сотрудников.

5. Ограничения модели

Несмотря на доказанные свойства алгоритмической разрешимости и инвариантности, предложенная модель ONYX имеет ряд ограничений.

Во-первых, эпистемологическое ограничение базы шаблонов (проблема атак «нулевого дня»). Согласно Теореме 2, полнота восстановления прямо зависит от репрезентативности конечного множества \mathcal{P} . Если система сталкивается с принципиально новым вектором гибридной атаки или каскадным сбоем, для парирования которого в базе знаний нет подходящего структурного паттерна (предусловия π_k), оператор R не сможет синтезировать валидную траекторию. В этом случае модель переходит в режим эскалации инцидента оператору-человеку, гарантируя нанесение ущерба, но теряя свойство автономности.

Во-вторых, вычислительная сложность в реальных масштабах (Enterprise-scale). Хотя проверка предиката $IsValid(s)$ относится к классу LOGSPACE по сложности данных, на практике информационные системы корпоративного уровня представляют собой графы с десятками миллионов вершин и ребер. В условиях лавинного потока инцидентов, например, при массивной DDoS-атаке, полный перебор допустимых применений шаблонов на этапе инстанцирования может привести к вычислительным задержкам, превышающим допустимое время реакции. Это потребует применения эвристик для сужения пространства поиска ΔS , перехода к графовым нейронным сетям для аппроксимации оператора R или перехода от дискретной природы модели к непрерывной, чтобы иметь возможность применять методы оптимизации, например, градиентный спуск.

В-третьих, уязвимость мета-уровня. Модель предполагает, что онтология \mathcal{L} и сами правила валидации (TGD и EGD) неизменны и защищены. Если злоумышленник, например, высокопривилегированный инсайдер, компрометирует сам инструмент адаптивного управления, изменяя предикаты или семантику базы \mathcal{P} , гарантии безопасности (Утверждение 1) аннулируются, так как нарушается аксиоматический базис модели.

6. Квалиметрическая оценка модели ONYX

ONYX – созидательная архитектурная модель: она проектирует новую структуру управления ИС, а не описывает существующую. Ее качество оценивается не по адекватности, а по пригодности – способности решать задачу адаптивного управления в условиях ДФ [23].

Показатели качества ONYX:

1) пригодность; ONYX, в отличие от фрагментарных подходов, интегрирует произвольное число уровней (в статье на примере обеспечивающего, персонала, аппаратного и программного уровней) в

единый формализованный граф, обеспечивая упреждающее обнаружение и коррекцию структурных и функциональных дисбалансов;

2) развиваемость; иерархия ONYX масштабируема – допускает введение новых уровней, например, виртуальной инфраструктуры, или агрегацию существующих;

3) соответствие стандартам; модель формализует требования стандартов⁹ через единый механизм состояний и переходов;

4) вычислимость; предикаты $IsValid(s)$ и $IsIntended(s)$ проверяются за полиномиальное время, оператор R гарантирует сохранение валидности – что обеспечивает практическую применимость.

Элементы модели ONYX апробированы при создании киберполигона МЧС России [24], проектировании фреймворка обоснования процедур мониторинга и реагирования на инциденты ИБ [25].

Пример. Рассмотрим инцидент на аппаратном уровне (*Hard* (ввод резерва) – на рисунке 1 слева): в результате DDoS-атаки эффективная пропускная способность основного канала связи v_{link} падает со 100 до 5 Мбит/с. При этом критический сервис v_{srv} (уровень *Soft* (сжатие данных), снижение требования к каналу – на рисунке 1 справа) требует поток данных $Demand = 20$ Мбит/с.

Состояние переходит в $s_1 \in S_{incident}$, так как нарушено условие валидности (параметрическое ограничение):

$$\begin{aligned} \text{prop}(v_{link}, 'bandwidth') &\geq \\ &\geq \text{prop}(v_{srv}, 'required_bandwidth'). \end{aligned}$$

Оператор R , анализируя граф, генерирует две альтернативные траектории восстановления:

1) внутриуровневую (средствами *Hard*); активация «спящего» резервного канала связи v_{backup} с пропускной способностью 100 Мбит/с и переключение маршрутизации; атрибут пропускной способности восстанавливается;

– кросс-уровневую (средствами *Soft*); в условиях физической невозможности подключения резерва; оператор R инстанцирует на программном уровне модуль сжатия трафика $v_{compressor}$; это действие модифицирует атрибуты сервиса, снижая его потребность в канале до $Demand' = 4$ Мбит/с.

Таким образом, неравенство восстанавливается ($5 \geq 4$), и система возвращается в штатный режим функционирования за счет программной адаптации к аппаратной деградации. Следовательно, ONYX является первой моделью, обеспечивающей упреждающее, X-адаптивное управление произвольным количеством уровней ИС как единым целым.

⁹ ISO/IEC 27001:2022 Clause 5, 7.1, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27003-2012 Clause 7.1, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27021-2021, ISO/IEC 27001:2022 Clause 7.2, ISO/IEC 27001:2022 Annex A.8 Asset Management, COBIT, ISO/IEC 27001 A.7–A.8, COBIT Technology

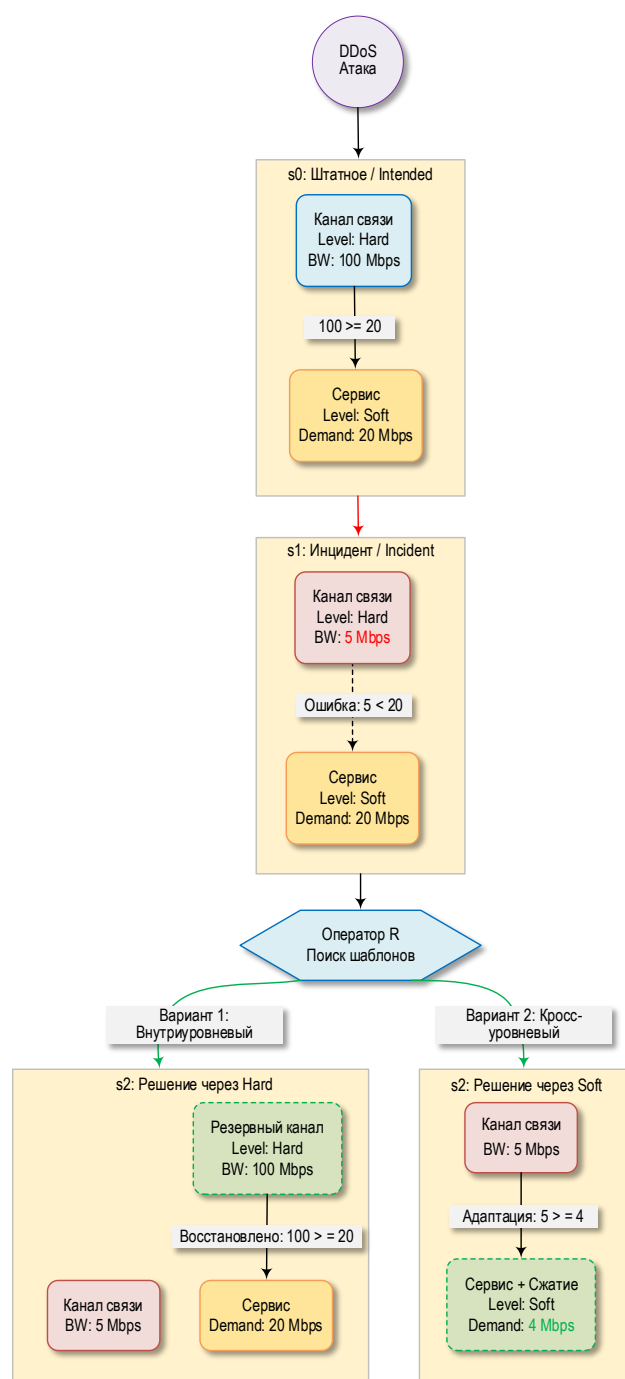


Рис. 1. Пример парирования параметрического возмущения: падение пропускной способности

Fig. 1. Illustration of Cross-Level Mitigation for a Bandwidth Reduction Incident

7. Обсуждение

База шаблонов \mathcal{P} в текущей реализации задается экстенционально, но формализм допускает ее интенциональное расширение, через мета-шаблоны или правила, сгенерированные методами машинного обучения. Это открывает путь к автоматическому синтезу стратегий адаптации и станет предметом дальнейших исследований.

Практическая реализация требует: создания унифицированной шины данных для построения графа из гетерогенных источников (CMDB, IdM, Asset Management); калибровки человеческого фактора по реальным метрикам; разработки гибридного оператора R , сочетающего автоматизацию и поддержку принятия решений.

Ключевое преимущество ONYX перед традиционными SOAR-подходами – математическая гарантия безопасности: каждое управляющее воздействие верифицируется на соответствие $IsValid(s)$, что исключает «дружественный огонь» при автоматическом реагировании.

Гибкость онтологии \mathcal{L} позволяет применять архитектуру ONYX не только к агрегированным классам ресурсов аппаратного или программного обеспечения, и к детализированным техническим стекам, таким как сетевая модель OSI. В этом случае стандартные 7 уровней OSI дополняются уровнями «Пользователь» и «Политика», что позволяет создать систему управления, охватывающую полный жизненный цикл передачи информации – от физической среды до бизнес-решения.

8. Заключение

В статье представлена архитектурная модель X -адаптивного управления информационной системой ONYX. В отличие от существующих подходов к управлению информационными системами, которые, как правило, либо ограничиваются отдельными уровнями (программно-аппаратным, нормативно-правовым, персонала и т. д.), либо опираются на предзаданные модели угроз и эвристические процедуры реагирования, впервые предложен подход, научная новизна которого заключается в следующем:

1) универсальность формализма (разработанный математический аппарат (графовая динамика с ограничениями FOL) инвариантен к конкретной семантике уровней; введенный автором НОР определяет класс рассматриваемых систем, однако сам формализм ONYX применим для управления не иерархическими (mesh, роевыми) и гибридными системами при замене НОР на соответствующие топологические ограничения);

2) теоретико-множественные условия адаптации (сформулированы и доказаны два необходимых и достаточных условия разрешимости задачи восстановления: структурное (принадлежность инцидента области притяжения целевого множества) и информационное (полнота базы шаблонов); это переводит задачу адаптации из области эвристики в область строгой алгоритмической разрешимости);

3) аналитические следствия иерархии (на основе топологии графа доказан эффект «Конуса влияния», демонстрирующий, что уровень иерархии

является мультипликатором ущерба; формально обоснована невозможность нейтрализации атак на верхние уровни, например, социальная инженерия против персонала средствами нижних уровней (ПО и оборудование), что требует реализации механизмов «горизонтального контроля» или мета-управления);

4) кросс-уровневая восстанавливаемость (показано, что связность графа состояний позволяет реализовывать функциональную избыточность: дефицит ресурсов на одном уровне, например, аппаратный сбой, может быть компенсирован структурной перестройкой на другом (программная адаптация), что расширяет границы живучести системы);

5) гарантированная безопасность управления (введены понятия инварианта валидности и относительной полноты оператора R , что обеспечивает

математическую гарантию того, что автоматическая реакция системы никогда не приведет к нарушению политик безопасности или целостности архитектурного замысла).

Практическая значимость модели состоит в создании фундамента для автоматизированных систем управления безопасностью, способных работать в условиях высокой неопределенности. Модель позволяет обнаруживать отклонения от целевого замысла на ранних стадиях (упреждающее управление) и генерировать верифицированные сценарии реагирования, объединяя организационные, кадровые и технические меры в единый контур управления. Перспективы развития связаны с внедрением методов машинного обучения для автоматического синтеза базы шаблонов \mathcal{P} , что позволит обеспечить полную автономность адаптации.

Список источников

1. Максимова Е.А. Аксиоматика инфраструктурного деструктивизма субъекта критической информационной инфраструктуры // Информатизация и связь. 2022. № 1. С. 68–74. DOI:10.34219/2078-8320-2022-13-1-68-74. EDN:ZMOPQB
2. Гурина Л.А., Томин Н.В. Интеллектуальные методы обеспечения кибербезопасности мультиагентных систем управления микросетями // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 6(64). С. 53–64. DOI:10.21681/2311-3456-2024-6-53-64. EDN:BORTZT
3. Wei L., Yang Y., Wu J., Long C., Li B. Trust Management for Internet of Things: A Comprehensive Study // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. Iss. 10. PP. 7664–7679. DOI:10.1109/JIOT.2021.3139989. EDN:JRPLEV
4. Nguyen T.T., Reddi V.J. Deep Reinforcement Learning for Cyber Security // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 34. Iss. 8. PP. 3779–3795. DOI:10.1109/TNNLS.2021.3121870. EDN:FKCUDV
5. Yin Z., Lin Y., Zhang Y., Qian Y., Shu F., Li J. Collaborative Multiagent Reinforcement Learning Aided Resource Allocation for UAV Anti-Jamming Communication // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. Iss. 23. PP. 23995–24008. DOI:10.1109/jiot.2022.3188833. EDN:CQKPMR
6. Wan Z., Cho J.H., Zhu M., Anwar A.H., Kamhoua C.A., Singh M.P. Resisting Multiple Advanced Persistent Threats via Hypergame-Theoretic Defensive Deception // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2023. Vol. 20. Iss. 3. PP. 3816–3830. DOI:10.1109/tnsm.2023.3240366. EDN:ISRRNW
7. Segovia-Ferreira M., Rubio-Hernan J., Cavalli A., Garcia-Alfaro J. A survey on cyber-resilience approaches for cyber-physical systems // ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 56. Iss. 8. PP. 1–37. DOI:10.1145/3652953
8. Kuikka V., Rantanen H. Resilience of Multi-Layer Communication Networks // Sensors. 2022. Vol. 23. Iss. 1. P. 86. DOI:10.3390/s23010086. EDN:JTEMYM
9. Wang X., Niu B., Shang Z., Niu Y. Distributed resilient adaptive consensus tracking control of nonlinear multi-agent systems dealing with deception attacks via K-filters approach // Automatica. 2024. Vol. 169. P. 111871. DOI:10.1016/j.automatica.2024.111871. EDN:SLWBOM
10. Canonico R., Sperli G. Industrial cyber-physical systems protection: A methodological review // Computers & Security. 2023. Vol. 135. P. 103531. DOI:10.1016/j.cose.2023.103531. EDN:SZERNJ
11. Arauz T., Chanfreut P., Maestre J.M. Cyber-security in networked and distributed model predictive control // Annual Reviews in Control. 2022. Vol. 53. PP. 338–355. DOI:10.1016/j.arcontrol.2021.10.005. EDN:DOVLWJ
12. Xing W., Shen J. Security Control of Cyber-Physical Systems under Cyber Attacks: A Survey // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 12. P. 3815. DOI:10.3390/s24123815. EDN:OXISLH
13. Luo M., Yu Z., Xiao Y., Xiong L., Xu Q., Ma L., Wu Z. Full-order adaptive sliding mode control with extended state observer for high-speed PMSM speed regulation // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 6200. DOI:10.1038/s41598-023-33455-x. EDN:SQOMRD
14. Полтавцева М.А. Модель активного мониторинга как основа управления безопасностью промышленных киберфизических систем // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 2(42). С. 51–60. DOI:10.21681/2311-3456-2021-2-51-60. EDN:WSMBXF
15. Blanco C., Rosado D.G., Varela-Vaca Á.J., Gómez-López M.T., Fernández-Medina E. Onto-CARMEN: Ontology-driven approach for Cyber-Physical System Security Requirements meta-modelling and reasoning // Internet of Things. 2023. Vol. 24. P. 100989. DOI:10.1016/j.iot.2023.100989. EDN:HYOTME
16. Bakirtzis G., Sherburne T., Adams S., Horowitz B.M., Beling P.A., Fleming C.H. An ontological metamodel for cyber-physical system safety, security, and resilience coengineering // Software and Systems Modeling. 2022. Vol. 21. Iss. 1. PP. 113–137. DOI:10.1007/s10270-021-00892-z. EDN:VGYIJO

17. Kayan H., Nunes M., Rana O., Burnap P., Perera C. Cybersecurity of Industrial Cyber-Physical Systems: A Review // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2022. Vol. 54. Iss. 11s. P. 229. DOI:10.1145/3510410
18. Rahman M.H., Shafae M. Cyber-Physical Security Vulnerabilities Identification and Classification in Smart Manufacturing: A Defense-in-Depth Driven Framework and Taxonomy // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2025. Vol. 25. Iss. 9. P. 091005. DOI:10.1115/1.4068844. EDN:OKVQFQ
19. Damm W., Hess D., Schweda M., Sztipanovits J., Bengler K., Biebl B. et al. A Reference Architecture of Human Cyber-Physical Systems–Part I: Fundamental Concepts // *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 8. Iss. 1. PP. 1–32. DOI:10.1145/3622879
20. Immerman N. *Descriptive Complexity* // Graduate Texts in Computer Science. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. DOI:10.1007/978-1-4612-0539-5
21. Грызунов В.В. Модель целенаправленных агрессивных действий на информационно-вычислительную систему // Труды Третьей международной научно-практической конференции «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (ЭРГО-2018, Санкт-Петербург, Российский Федерация, 07.06.2018). Тверь: Межрегиональная общественная организация "Эргономическая ассоциация", 2018. С. 300–305. EDN:YUORVZ
22. Gryzunov V.V. Conceptual Model for Adaptive Control of a Geographic Information System under Conditions of Destabilization // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2021. Vol. 55. Iss. 8. PP. 1222–1227. DOI:10.3103/S0146411621080381. EDN:KWLWGO
23. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI:10.31857/S9785907036321000001. EDN:VVUKQW
24. Грызунов В.В., Шестаков А.В. Модель системы адаптивного управления киберполигоном МЧС России на основе операторного уравнения // *Вопросы кибербезопасности*. 2024. № 6(64). С. 140–149. DOI:10.21681/2311-3456-2024-6-140-149. EDN:GSHMNZ
25. Грызунов В.В., Шестаков А.В. Многоуровневый фреймворк обоснования процедур мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности // *Вопросы кибербезопасности*. 2025. № 6(70). С. 14–24. DOI:10.21681/2311-3456-2025-6-14-24. EDN:HTFRHK

References

1. Maksimova E.A. Axiomatics of infrastructural destructivism of a critical information infrastructure subject. *Informatization and communication*. 2022;1:68–74. (in Russ.) DOI:10.34219/2078-8320-2022-13-1-68-74. EDN:ZMOPQB
2. Gurina L.A., Tomin N.V. Intelligent methods of ensuring cybersecurity of multi-agent microgrid control systems. *Voprosy kiberbezopasnosti (Cybersecurity Issues)*. 2024;6(64):53–64. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2024-6-53-64. EDN:BORTZT
3. Wei L., Yang Y., Wu J., Long C., Li B. Trust Management for Internet of Things: A Comprehensive Study. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(10):7664–7679. DOI:10.1109/JIOT.2021.3139989. EDN:JRPLEV
4. Nguyen T.T., Reddi V.J. Deep Reinforcement Learning for Cyber Security. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021;34(8):3779–3795. DOI:10.1109/TNNLS.2021.3121870. EDN:FKCUDV
5. Yin Z., Lin Y., Zhang Y., Qian Y., Shu F., Li J. Collaborative Multiagent Reinforcement Learning Aided Resource Allocation for UAV Anti-Jamming Communication. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(23):23995–24008. DOI:10.1109/jiot.2022.3188833. EDN:CQKPMR
6. Wan Z., Cho J.H., Zhu M., Anwar A.H., Kamhoua C.A., Singh M.P. Resisting Multiple Advanced Persistent Threats via Hypergame-Theoretic Defensive Deception. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2023;20(3):3816–3830. DOI:10.1109/tnsm.2023.3240366. EDN:ISRRNW
7. Segovia-Ferreira M., Rubio-Hernan J., Cavalli A., Garcia-Alfaro J. A survey on cyber-resilience approaches for cyber-physical systems. *ACM Computing Surveys*. 2024;56(8):1–37. DOI:10.1145/3652953
8. Kuikka V., Rantanen H. Resilience of multi-layer communication networks. *Sensors*. 2022;23(1):86. DOI:10.3390/s23010086. EDN:JTEMYM
9. Wang X., Niu B., Shang Z., Niu Y. Distributed resilient adaptive consensus tracking control of nonlinear multi-agent systems dealing with deception attacks via K-filters approach. *Automatica*. 2024;169:111871. DOI:10.1016/j.automatica.2024.111871. EDN:SLWBOM
10. Canonico R., Sperli G. Industrial cyber-physical systems protection: A methodological review. *Computers & Security*. 2023;135:103531. DOI:10.1016/j.cose.2023.103531. EDN:SZERNJ
11. Arauz T., Chanfreut P., Maestre J.M. Cyber-security in networked and distributed model predictive control. *Annual Reviews in Control*. 2022;53:338–355. DOI:10.1016/j.arcontrol.2021.10.005. EDN:DOVLWJ
12. Xing W., Shen J. Security Control of Cyber-Physical Systems under Cyber Attacks: A Survey. *Sensors*. 2024;24(12):3815. DOI:10.3390/s24123815. EDN:OXISLH
13. Luo M., Yu Z., Xiao Y., Xiong L., Xu Q., Ma L., Wu Z. Full-order adaptive sliding mode control with extended state observer for high-speed PMSM speed regulation. *Scientific Reports*. 2023;13(1):6200. DOI:10.1038/s41598-023-33455-x. EDN:SQOMRD
14. Poltavtseva M. Active monitoring model as a basis for security management of industrial CPS. *Voprosy kiberbezopasnosti (Cybersecurity Issues)*. 2021;42(2):51–60. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2021-2-51-60. EDN:WSMBXF
15. Blanco C., Rosado D.G., Varela-Vaca Á.J., Gómez-López M.T., Fernández-Medina E. Onto-CARMEN: Ontology-driven approach for Cyber-Physical System Security Requirements meta-modelling and reasoning. *Internet of Things*. 2023;24:100989. DOI:10.1016/j.iot.2023.100989. EDN:HYOTME


16. Bakirtzis G., Sherburne T., Adams S., Horowitz B.M., Beling P.A., Fleming C.H. An ontological metamodel for cyber-physical system safety, security, and resilience coengineering. *Software and Systems Modeling*. 2022;21(1):113–137. DOI:10.1007/s10270-021-00892-z. EDN:VGYIJO
17. Kayan H., Nunes M., Rana O., Burnap P., Perera C. Cybersecurity of industrial cyber-physical systems: A review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2022;54(11s):229. DOI:10.1145/3510410
18. Rahman M.H., Shafae M. Cyber-Physical Security Vulnerabilities Identification and Classification in Smart Manufacturing: A Defense-in-Depth Driven Framework and Taxonomy. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2025;25(9):091005. DOI:10.1115/1.4068844. EDN:OKVQFQ
19. Damm W., Hess D., Schweda M., Sztipanovits J., Bengler K., Biebl B. et al. A Reference Architecture of Human Cyber-Physical Systems—Part I: Fundamental Concepts. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2024;8(1):1–32. DOI:10.1145/3622879
20. Immerman N. *Descriptive Complexity*. Graduate Texts in Computer Science. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1999. DOI:10.1007/978-1-4612-0539-5
21. Gryzunov V.V. Model of Purpose Aggressive Actions on the Information-Computing System. *Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference on Human Factor in Complex Technical Systems and Environments, ERGO-2018, 07.06.2018, St. Petersburg, Russian Federation*. Tver: Ergonomic Association Publ.; 2018. p.300–305. (in Russ.) EDN:YUORVZ
22. Gryzunov V.V. Conceptual Model for Adaptive Control of a Geographic Information System under Conditions of Destabilization. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2021;55(8):1222–1227. DOI:10.3103/S0146411621080381. EDN:KWLWGO
23. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Qualimetry of Models and Polymodel Complexes*. Moscow: RAS Publ.; 2018. 314 p. (in Russ.) DOI:10.31857/S9785907036321000001. EDN:VVUKQW
24. Gryzunov V.V., Shestakov A.V. Model of the adaptive control system of the cyber range of the russian emergencies ministry based on the operator equation. *Voprosy kiberbezopasnosti (Cybersecurity Issues)*. 2024;64(6):140–149. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2024-6-140-149. EDN:GSHMNZ
25. Gryzunov V.V., Shestakov A.V. A multi-level framework for justifying information security incident monitoring and response procedures. *Voprosy kiberbezopasnosti (Cybersecurity Issues)*. 2025;6(70):14–24. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2025-6-14-24. EDN:HTFRHK

Статья поступила в редакцию 10.01.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 17.04.2026

The article was submitted 10.01.2026; approved after reviewing 18.03.2026; accepted for publication 17.04.2026

Информация об авторе:

ГРЫЗУНОВ
Виталий Владимирович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной информатики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России
 <https://orcid.org/0000-0003-4866-217X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 519.876.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138>

EDN:XYELRO



Разработка программных средств адаптивного управления дорожным трафиком и оценка их эффективности

✉ Дмитрий Александрович Пелих¹, pelih.da@sut.ru

✉ Наталья Викторовна Шаталова², shatillen@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена тем, что, с одной стороны, развитие искусственного интеллекта и информационных технологий в целом открывает новые перспективы внедрения в процессы дорожного регулирования инновационных методик и алгоритмов управления трафиком, а с другой – в большинстве существующих решений присутствует ряд ограничений: статические модели не адаптивны к изменениям интенсивности потока автомобилей и не рассчитаны на эффективную работу в условиях пиковых нагрузок, а динамические обладают медленной реакцией на непредсказуемые ситуации, например, возникновение аварий или массовые мероприятия, а также их применение ограничено особенностями регионов.

Целью данной работы является выбор граничных параметров разработанного алгоритма и анализ его эффективности по сравнению с другими методами управления дорожным трафиком. В ходе исследования были использованы **методы** теории массового обслуживания и теории графов для модели дорожного движения, мультиагентный подход и обучение с подкреплением для алгоритма управления фазами светофоров, для оценки эффективности системы – имитационное моделирование.

Решение научной задачи: сформированы функциональные требования разработанного программного обеспечения; проведена серия экспериментов по имитационному моделированию процесса управления дорожным трафиком при различных сценариях; реализована имитационная модель участка дороги Невского района Санкт-Петербурга; проведен ряд экспериментов по моделированию дорожной ситуации и оптимизации длительности фаз светофора, а также выявлению граничных параметров эффективно функционирующей системы; проведен сравнительный анализ методов управления дорожным трафиком.

Научная новизна работы определяется авторским подходом к комбинированию способов управления дорожным трафиком и формированию алгоритма, выявляющего наиболее подходящие методы для текущей дорожной ситуации.

Практическая значимость разработанного решения состоит в том, что оно более эффективно по сравнению с другими, рассматриваемыми в статье, алгоритмами и может быть использовано для управления автомобильным трафиком и анализа эффективности дорожной сети.

Ключевые слова: мультиагентные системы, управление дорожным трафиком, имитационное моделирование, оценка эффективности

Ссылка для цитирования: Пелих Д.А., Шаталова Н.В. Разработка программных средств адаптивного управления дорожным трафиком и оценка их эффективности // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 129–138. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138. EDN:XYELRO

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138>
EDN:XYELRO

Adaptive Traffic Management Software Development and Evaluation of Its Effectiveness

 **Dmitriy A. Pelikh**¹✉, pelih.da@sut.ru
 **Natalia V. Shatalova**², shatillen@mail.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Annotation

The relevance of this research is due to the fact that, on the one hand, the development of artificial intelligence and information technologies in general opens up new prospects for the implementation of innovative traffic management methods and algorithms in road regulation processes, and on the other hand, most existing solutions are not adaptive to changes in the intensity of vehicle traffic and are not designed to operate effectively under peak loads.

The purpose of this work is to select the boundary parameters of the developed algorithm and analyze its effectiveness in comparison with other methods of traffic control.

The paper uses **methods** of queuing theory and graph theory for the traffic model, and also applies a multi-agent approach and reinforcement learning for the algorithm of traffic light phases control, simulation modeling is used to evaluate the system efficiency.

Results. In the course of solving the scientific problem, the functional requirements of the developed software were formed. A series of experiments was conducted on the simulation of the traffic management process under various scenarios. A simulation model of a road section in the Nevsky District of St. Petersburg was implemented. A number of experiments were conducted on the simulation of traffic situations and the optimization of the duration of traffic light phases, as well as the identification of the boundary parameters for the effective functioning of the system. A comparative analysis of traffic management methods was conducted.

The scientific novelty of the work is determined by the author's approach to combining methods of road traffic management and creating an algorithm that identifies the most suitable methods for the current traffic situation.

The practical significance of the developed solution lies in the fact that it is more effective than other algorithms considered in the article and can be used for managing road traffic and analyzing the efficiency of the road network.

Keywords: multi-agent systems, traffic management, simulation modeling, and performance evaluation

For citation: Pelikh D.A., Shatalova N.V. Adaptive Traffic Management Software Development and Evaluation of Its Effectiveness. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):129-138. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138. EDN:XYELRO

Введение

В современных реалиях все большей проблемой мегаполисов становится возникновение заторов на дорогах. Помимо развития дорожной инфраструктуры в качестве важного фактора, влияющего на эту проблему, выступает управление светофорными объектами. В [1] приведен анализ некоторых существующих интеллектуальных светофорных комплексов. В [2] рассматриваются технологиче-

ские основы интеллектуальных транспортных систем. Целью данной работы является описание процесса разработки программных компонентов автоматической системы управления дорожным трафиком и оценка их эффективности путем проведения серии имитационных экспериментов. Основным параметром качества системы выбрано количество автомобилей в очереди на каждом из дорожных направлений в определенный момент времени.

Адаптивные системы управления дорожным движением в реальном времени собирают данные о состоянии трафика и динамически корректируют параметры работы светофоров. Эффективность таких систем напрямую зависит от качества алгоритмов, лежащих в их основе, и точности оценки их работы до внедрения в реальных условиях.

Функционал существующих систем в области управления дорожной инфраструктуры сильно продвинулся в последнее время, однако присутствует ряд ограничений, среди которых можно выделить следующие:

1) классические статические модели управления трафиком, такие как модель Вебстера, вообще не адаптированы к условиям, когда входной поток автомобилей на перекрестке превышает его пропускную способность, то есть эффективно использоваться в условиях дорожных заторов;

2) динамические методы уже более специализированы к решению данной проблемы, однако, во-первых, использование систем, которые их реализуют, ограничено особенностями регионов, а во-вторых, эти системы обладают низкой адаптивностью к непредсказуемым ситуациям, например, возникновению аварий или массовым мероприятиям;

3) существующие системы, как правило, используют узкий набор методов, пренебрегая другими, которые, в свою очередь, могут быть полезны в определенных дорожных ситуациях;

4) текущие решения направлены на реализацию некоторой определенной задачи и не позволяют организовать управление дорожной инфраструктурой, принимая во внимание совокупность факторов, например, производить автоматизированный выбор вариантов внедрения новых объектов дорожного полотна на основе моделирования трафика в каждом из вариантов;

5) управление дорожной инфраструктурой ограничено масштабом небольших дорожных участков (не считая специализированных проектов, таких как цифровой двойник Сингапура) и не реализуется в рамках целых городов или их районов.

На основании вышеперечисленных ограничений существующих систем в процессе разработки программного обеспечения управления дорожной инфраструктурой ставятся следующие задачи:

– выбор показателей качества программных средств управления дорожным трафиком и разработки механизмов их оценки;

– проведение экспериментов по имитационному моделированию системы управления дорожным трафиком при различных сценариях с целью определения граничных условий эффективности систем λ_{\min} и λ_{\max} , минимальной и максимальной интенсивности поступающих в модель транспортных средств (ТС);

– анализ эффективности методов управления дорожным трафиком.

Описание разработанных программных средств управления дорожным движением

Реализация управления дорожным трафиком производится с помощью построенного авторами алгоритма, основанного на мультиагентном подходе. Каждому перекрестку назначается программный агент, реализующий поиск распределения длительности фаз, соответствующего самой большой пропускной способности этого перекрестка. В зависимости от сложности перекрестка и от его степени насыщенности в данный момент используются разные методы поиска, для незагруженных участков – статические методы, такие как метод Вебстера, не требующие больших ресурсов на расчет, а для направлений, в которых образуются заторы, поиск длительности фаз производится с помощью более сложных алгоритмов оптимизации. Степень насыщенности определяется как отношение интенсивности поступающих на определенное направление автомобилей к пропускной способности перекрестка в данном направлении. Далее агенты взаимодействуют посредством передачи сообщений и принимают решение о выборе конечного расписания длительности фаз для каждого из перекрестков на основании минимизации значения функции ожидания автомобилями проезда перекрестка для всей дорожной сети. Более подробно данный алгоритм описан в других работах авторов, например, в [3]. В процессе проектирования также были использованы модели, описанные в [4–6]. Для тестирования и оценки существующих и внедрения принципиально новых алгоритмов разработаны программные средства управления дорожным движением. Подсистема обработки данных предоставляет возможность импорта в формате CSV (аббр. от англ. Comma-Separated Values) или ручного задания пользователем значений параметров как дорожной сети, так и дорожного движения.

В первую группу параметров входят:

- количество направлений движения (подразумевается отрезок дороги, ограниченный соседними перекрестками или точками обрыва модели);
- длина каждого из направлений, измеряемая в метрах;
- количество полос в каждом направлении;
- количество перекрестков с указанием входящих в них направлений.

Пример конфигурации участка дорожной сети, сформированной пользователем «вручную» приведен на рисунке 1. Параметры дорожного движения уже зависят от времени и могут быть указаны отдельно для каждого дня или времени суток. Они должны быть определены дискретным набором значений (рисунок 2а) для заданных промежутков времени (t). В эту группу параметров входят интенсивность ТС, вероятности поворота, длительности фаз светофоров.

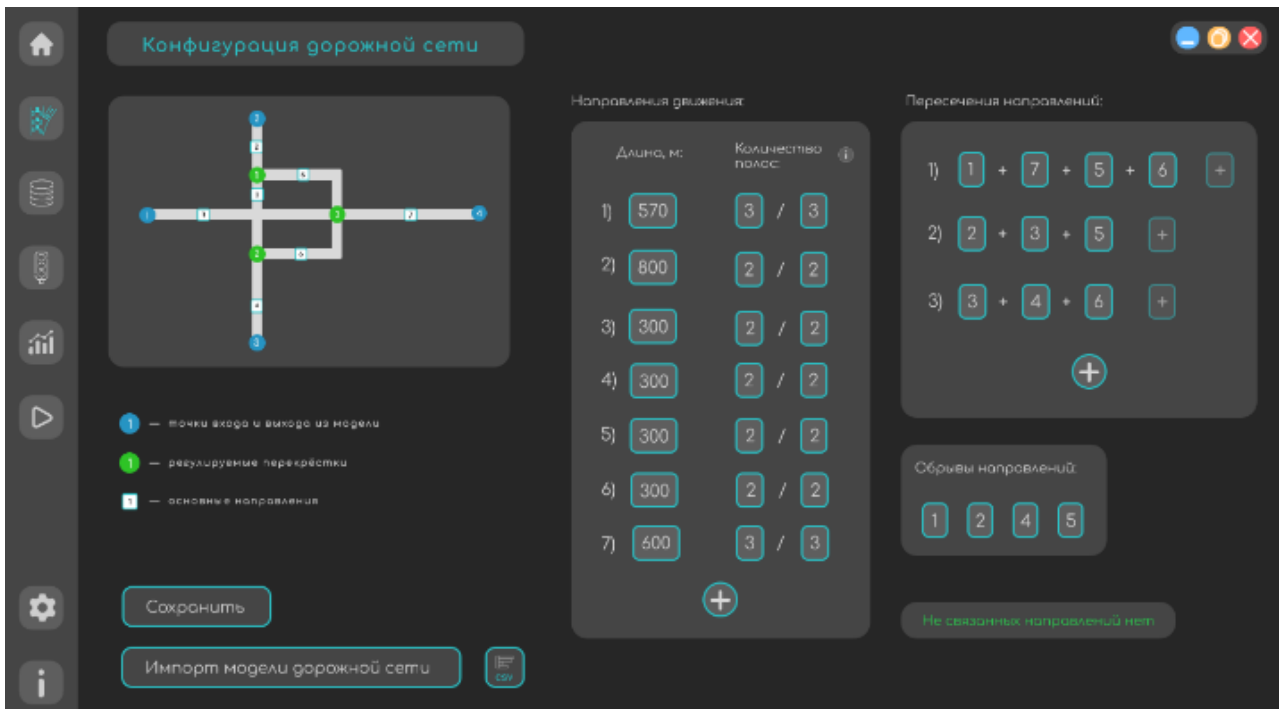


Рис. 1. Конфигурация участка дорожной сети

Fig. 1. Configuration of a Section of the Road Network

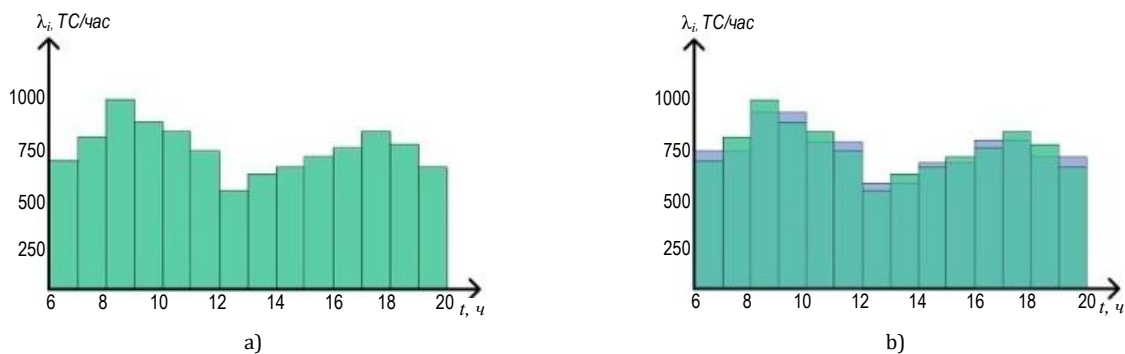


Рис. 2. Пример распределения интенсивности ТС в течение дня

Fig. 2. An Example of the Distribution of Vehicle Intensity throughout the Day

Интенсивность ТС, поступающих на каждое из направлений (ТС/час). При импорте данных система позволяет уменьшить частоту дискретизации этого параметра (например, для уменьшения нагрузки на аппаратную часть устройства, на котором происходит развертывание программы) путем приведения входящих в новый интервал значений к среднему арифметическому (рисунок 2b). Также присутствует функционал заполнения случайно возникших пропусков значений путем интерполяции методом скользящего среднего.

Вероятности поворота. Указываются для каждой пары направлений на перекрестке (вероятность разворота определяется путем вычитания из единицы суммы указанных значений). В случае наличия данных о дорожных ситуациях за прошедший период времени или полученных в ходе проведения имитационных экспериментов вероятности

могут быть рассчитаны путем нормирования к единице количества ТС, проехавших по каждой паре направлений.

Длительности фаз светофоров. Пользователем указываются (до запуска процесса моделирования) только первоначальные (референсные) значения, в дальнейшем этот показатель оптимизируется (например, с целью минимизации количества ТС в очереди).

После запуска система в автоматизированном режиме предлагает оптимальное распределение длительности фаз светофора и отображает предполагаемое в определенный момент времени дорожное состояние (количество ТС на каждом из направлений). Процесс формирования результирующих данных основан на применении мультиагентного подхода, принципы которого изложены в [7–10], а

также обучении с подкреплением [11–12]. Также выходные данные можно использовать, например, для кластерного анализа с целью выявления узких мест и оптимизации движения [13].

Проведение экспериментов по выявлению граничных параметров

Для проведения экспериментов по выявлению граничных параметров, при которых система функционирует эффективно, построена имитационная

модель участка дорожной сети (топология представлена на рисунке 3). Модель имеет 18 основных направлений, 8 регулируемых перекрестков и 10 точек входа и выхода ТС из модели, представляющих собой обрыв дороги. Система предоставляет возможность указания интенсивности поступающих и убывающих в эти точки модели автомобилей в виде дискретного для каждого из промежутков времени значений. На рисунке 4 приведена модель данного участка дорожной сети, для визуализации нанесенная на карту.

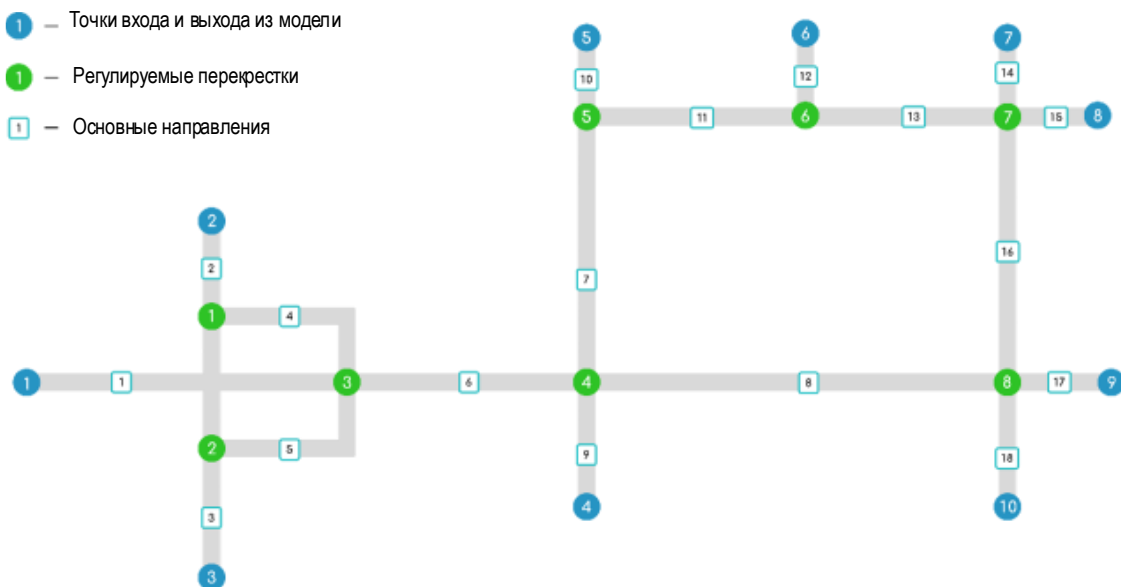


Рис. 3. Топология построенного участка дорожной сети
Fig. 3. Topology of the Constructed Section of the Road Network

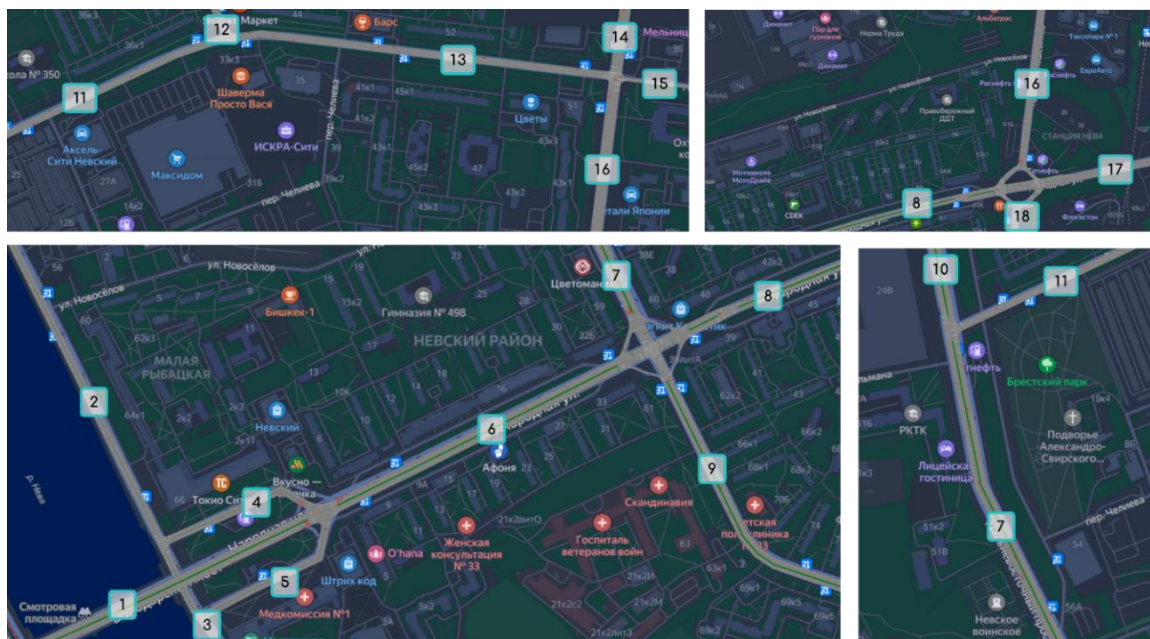


Рис. 4. Моделируемый участок дорожной сети
Fig. 4. The Simulated Section of the Road Network

На рисунке 5 приведен фрагмент логической схемы моделируемого участка дорожной сети, определяющей возможные маршруты следования ТС и отображающей количество проехавших через каждое направление автомобилей. В качестве входных данных модели выступают длины направлений дорог (участков между перекрестками или точками входа), количество полос по каждому из направлений (таблица 1) и интенсивность поступающих в модель ТС (таблица 2). Исходные данные

получены посредством парсинга в сети интернет. Для проведения экспериментов были выбраны три момента времени (T_1, T_2, T_3), входные данные которых примерно соответствуют дорожной ситуации на моделируемом участке в 7:00, 7:30 и 8:00 буднего дня. Под выходными данными принимается распределение длительности фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) и количество ТС в очереди в момент времени T_i (таблица 2).

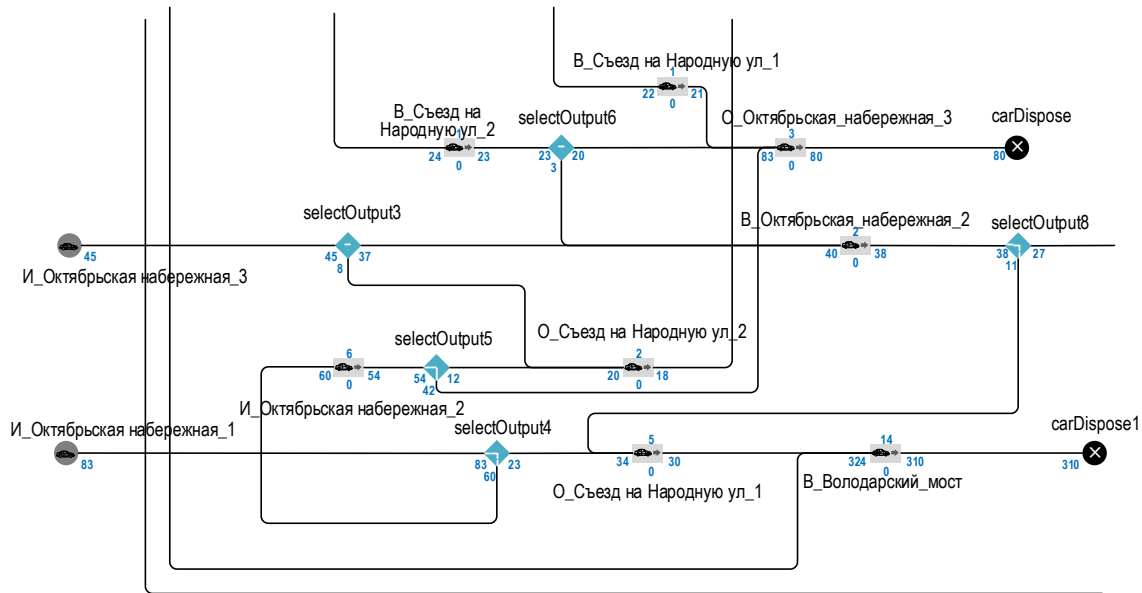


Рис. 5. Фрагмент логической схемы моделируемого участка дорожной сети
 Fig. 5. Fragment of the Logical Scheme of the Simulated Road Network Section

Эксперименты производились для отличающийся последовательности интенсивность поступающих в модель ТС, при этом:

$$\lambda_{cp}(T_1) < \lambda_{cp}(T_2) < \lambda_{cp}(T_3),$$

где $\lambda_{cp}(T_i)$ – среднее по всем направлениям значение интенсивности для каждого момента времени T_i .

Распределение длительностей фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) производилось системой в автоматическом режиме.

ТАБЛИЦА 1. Входные данные и количество ТС в очереди в момент времени T_i

TABLE 1. Input Data and the Number of Vehicles in the Queue at Time T_i

Направление	Длина, м	Количество полос (основного / встречного движения)	Количество ТС в очереди в момент времени T_i		
			T_1	T_2	T_3
1	570	3/3	10	20	27
2	800	2/2	5	11	7
3	300	2/2	4	12	9
4	300	2/2	3	5	7
5	300	2/2	4	7	11

Направление	Длина, м	Количество полос (основного / встречного движения)	Количество ТС в очереди в момент времени T_i		
			T_1	T_2	T_3
6	600	3/3	23	56	63
7	900	3/3	20	45	48
8	1000	2/2	36	86	97
9	760	3/2	18	34	46
10	200	3/3	9	13	20
11	900	2/2	5	6	8
12	100	2/2	3	4	3
13	680	2/2	10	8	10
14	200	3/3	6	7	9
15	200	1/1	4	3	5
16	780	3/3	16	21	33
17	400	3/3	17	18	27
18	300	3/3	22	27	32
Сумма ТС в очереди по всем направлениям			215	383	462

ТАБЛИЦА 2. Данные модели по точкам входа и выхода из модели и регулируемым перекресткам

TABLE 2. Model Data for Entry and Exit Points and Controlled Intersections

Точки входа и выхода из модели	Интенсивность поступающих в модель ТС, ТС/ч			Регулируемые перекрестки	Распределение длительности фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) в момент времени T_i		
	T_1	T_2	T_3		T_1	T_2	T_3
1	300	400	500	1	60/60	65/60	70/60
2	340	380	480	2	60/60	60/55	60/55
3	320	410	490	3	60/40	60/30	70/40
4	540	670	810	4	70/60	80/60	90/60
5	630	780	910	5	60/60	60/55	70/55
6	320	430	680	6	40/40	45/40	50/40
7	710	920	1180	7	90/35	110/35	110/40
8	90	120	210	8	80/50	90/50	95/50
9	930	1190	1380				
10	380	680	790				

Анализ эффективности процесса корректировки длительности фаз

Для анализа эффективности процесса корректировки длительности фаз проведен ряд экспериментов с помощью имитационной модели, представленной в предыдущем разделе, а используемые входные данные представлены в таблицах 1 и 2.

Корректировка длительности фаз светофоров производилась тремя различными способами:

- с помощью генетического алгоритма оптимизации [14–15]; результаты приведены на рисунке 6 (в левой части);
- посредством алгоритма оптимизации OptQuest от компании OptTek; данное решение реализовано в программе AnyLogic при использовании библио-

теки дорожного движения [16], результаты также приведены на рисунке 6 (в правой части);

– при помощи алгоритма, использованного реализуемой в рамках текущей работы системой (описан выше).

Результаты процесса корректировки длительности фаз светофоров при помощи разрабатываемого алгоритма также представлены в таблице 2. Проведены эксперименты по моделированию дорожной ситуации в различное время (T_1, T_2, T_3). Результаты моделирования в момент времени T_1 для различных методов оптимизации приведены на рисунке 7. В качестве критерия оптимизации выступает среднее время ожидания автомобилем проезда перекрестка. В отображаемой сцене модели красным цветом представлена динамическая картина автомобилей, движущихся по дорожной сети. На правой панели отображена статистика хода эксперимента, в частности время в модели и нагрузка на аппаратную часть.

	Текущее	Лучшее
Итерация	104	7
Функционал	0	0
Параметры	Copy best	
phase1_duration	19,28	67,571
phase2_duration	37,861	47,489
phase3_duration	46,705	21,74
phase4_duration	53,252	88,892
phase5_duration	25,7	82,363
phase6_duration	69,044	15,189

Рис. 6. Результаты оптимизации с помощью генетического алгоритма и алгоритма OptQuest

Fig. 6. Optimization Results Using the Genetic Algorithm and the OptQuest Algorithm

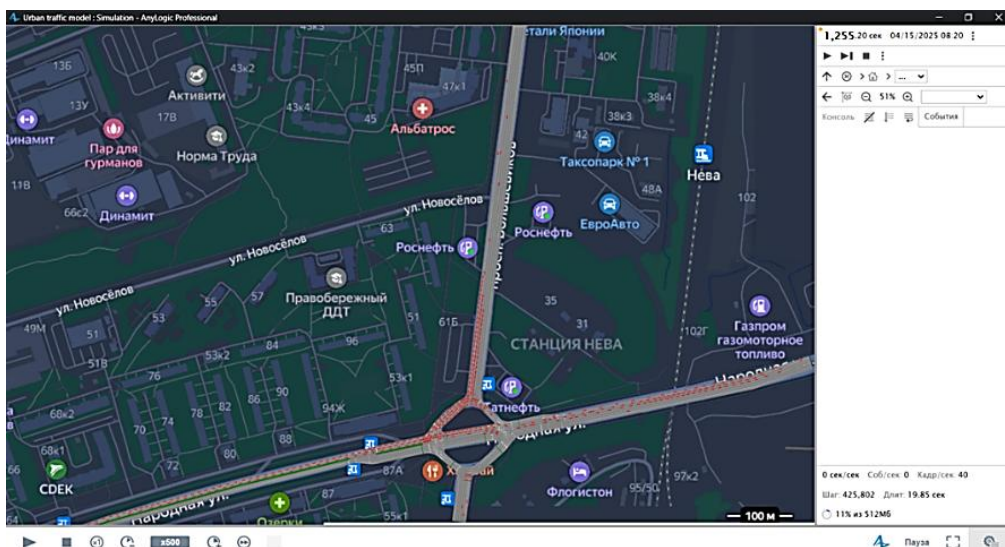


Рис. 7. Результаты моделирования, оптимизация с помощью разрабатываемого алгоритма

Fig. 7. Simulation Results and Optimization Using the Developed Algorithm

В качестве основного параметра оценки эксперимента используется средняя длина очереди, а именно среднее значение количества автомобилей, находящихся перед перекрестками по каждому из

направлений в определенные моменты времени T_1 – T_3 . Результаты эксперимента приведены в таблице 3 и на рисунке 8.

ТАБЛИЦА 3. Результаты эксперимента

TABLE 3. The Results of the Experiment

Направление	Количество ТС в очереди в момент времени T_i								
	Генетический оптимизатор			OptQuest			Разрабатываемый алгоритм		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
1	12	28	36	18	31	42	10	20	27
2	5	15	9	7	18	9	5	11	7
3	3	17	11	5	15	18	4	12	9
4	5	7	8	5	9	7	3	5	7
5	6	9	21	6	8	26	4	7	11
6	30	75	84	32	84	96	23	56	63
7	37	52	55	33	62	72	20	45	48
8	56	104	112	54	117	123	36	86	97
9	37	45	63	33	52	69	18	34	46
10	12	20	31	16	26	37	9	13	20
11	7	8	12	5	9	15	5	6	8
12	5	6	9	7	6	7	3	4	3
13	18	7	12	22	11	17	10	8	10
14	8	8	11	7	6	13	6	7	9
15	4	4	7	6	7	8	4	3	5
16	23	28	42	26	32	51	16	21	33
17	19	22	26	18	29	31	17	18	27
18	28	45	49	32	49	52	22	27	32
Сумма ТС в очереди по всем направлениям	315	500	598	332	571	693	215	383	462

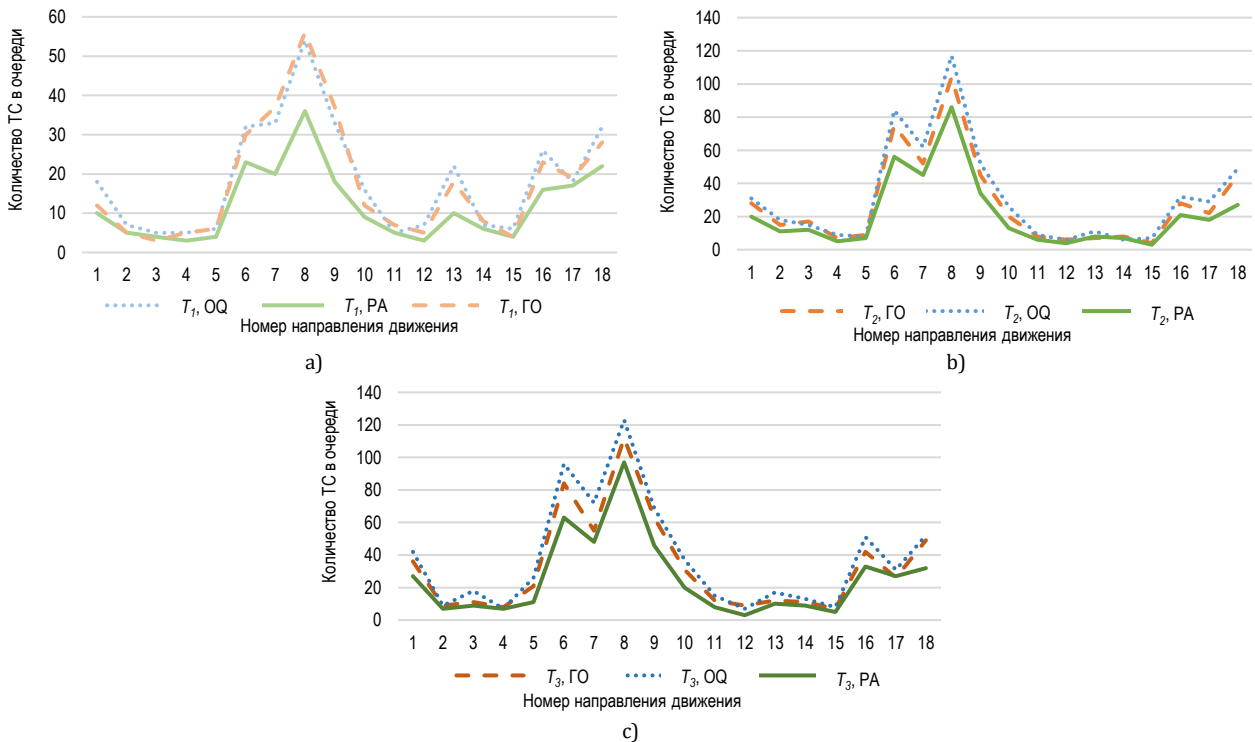


Рис. 8. Результаты эксперимента в момент времени: а) T_1 ; б) T_2 ; в) T_3

Рис. 8. The Results of the Experiment, Time Point: а) T_1 ; б) T_2 ; в) T_3

Заключение

Проведенное моделирование позволяет провести количественный анализ управления дорожным движением. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о граничных условиях: система эффективна при значениях интенсивности поступающих в модель ТС в интервале от $\lambda_{\min} \approx 300$ до $\lambda_{\max} \approx 1500$ автомобилей в час.

В случае, если $\lambda < \lambda_{\min}$, методы, используемые в разработанном алгоритме, избыточны и при этом обеспечивают высокую нагрузку на аппаратную часть устройства, на котором проводится моделирование. Таким образом, достаточно статических методов регулирования трафика. Для решения данной проблемы в перспективе возможно внесение корректировки в алгоритм управления, а именно отключение агентов, реализующих такие методы, если $\lambda_i < \mu_i$.

В случае, если $\lambda > \lambda_{\min}$, происходит «перегрузка» дорожной сети и дальнейшее увеличение λ ведет

только к снижению ее пропускной способности. Для решения данной проблемы система предусматривает внесение изменений в конфигурацию дорожной сети, например, увеличения количества полос, формирование новых съездов и развязок, что и подразумевает возможность планирования дорожной инфраструктуры на основании анализа трафика ТС.

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что корректировка длительности фаз светофоров при помощи одного только генетического алгоритма не так эффективна, как при помощи разработанного алгоритма. Сторонний алгоритм оптимизации, в качестве которого выступал OptQuest, также не так эффективен. Таким образом, разработка адаптивных алгоритмов, включающих в себя определенную комбинацию разных методов оптимизации параметров дорожного движения может быть эффективна в практическом применении систем управления транспортной инфраструктурой.

Список источников

1. Малыгин И.Г. Интеллектуальные светофорные комплексы и пути внедрения их в мегаполисах // Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии построения когнитивных транспортных систем» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 30–31 мая 2018 г.). СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2018. С. 15–20. EDN:XRWWTJ
2. Шаталова Н.В., Орешкина А.Д. Технологические принципы интеллектуальных транспортных систем // IV Международная научно-практическая конференция по направлению НИИ Автонет «Перспективные транспортные технологии: материалы» (Екатеринбург, Российская Федерация, 8 июля 2025 г.). М.: Московский Политех, 2025. С. 159–164. EDN:LBQFJM
3. Бондаренко И.Б., Пелих Д.А. Проектирование архитектуры мультиагентной системы в решении частных задач городского управления // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 2. С. 48–51. EDN:DRPBFF
4. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Изюмский А.А., Коцурба С.В. Элементы дорожной инфраструктуры и влияние их на безопасность дорожного движения // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2022. Т. 12. № 2. С. 49–68. DOI:10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68. EDN:OKEKTL
5. Зиарманд А.Н., Хаханов В.И. Модели и методы мониторинга и управления транспортом // Радиоэлектроника и информатика. 2016. № 3. С. 64–80.
6. Елькин Д.М., Вяткин В.В. На пути к интернету вещей в управлении транспортными потоками: обзор существующих методов управления дорожным движением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 5(207). С. 100–113. DOI:10.23683/2311-3103-2019-5-100-113. EDN:XZWTPC
7. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3. С. 106–124. EDN:IMQNUP
8. Родзина Л.С. Прикладные многоагентные системы. Программирование на платформе JADE. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, 2011. 174 с.
9. Маслобоев А.В. Модели и алгоритмы взаимодействия программных агентов в виртуальной бизнес-среде развития инноваций // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12. № 2. С. 224–234. EDN:KPYRAD
10. Душкин Р.В. Многоагентные системы для кооперативных ИТС // Тренды и управление. 2021. № 1. С. 42–50. DOI:10.7256/2454-0730.2021.1.34169. EDN:ZNESUF
11. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Моор А.Д., Берстенева В.И. Оптимизация работы адаптивных светофоров на основе использования машинного зрения // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2020. Т. 14. № 1. С. 189–196. DOI:10.14529/em200119. EDN:YWEJSZ
12. Расулмухамедов М.М., Ташметов К.Ш. Оптимизация управления транспортным потоком на перекрестках с помощью нейронной сети // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № S1(35-1):92–96. EDN:YBZSPQ
13. Поваляев Н.Д., Крылатов А.Ю., Шаталова Н.В. Методы кластерного анализа дорожных сетей для выявления узких мест и оптимизации движения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 7. С. 34–40. DOI:10.36724/2072-8735-2025-19-7-34-40. EDN:AALGBX
14. Акопов А.С., Зарипов Е.А., Мельников А.М. Адаптивное управление транспортной инфраструктурой в городской среде с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 2. С. 48–66. DOI:10.17323/2587-814X.2024.2.48.66. EDN:DTPMML
15. Haupt R.L., Haupt S.E. Practical genetic algorithms. Wiley, 2004.

16. Архангельский А.Н. Моделирование движения автомобиля в транспортном потоке на ЭВМ // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020;1(07):26–31. DOI:10.30987/2658-6436-2020-1-26-31. EDN:EBPRMN

References


1. Malygin I.G. Problems and Perspectives of Using Intellectual Transport Safety Systems in the Megacities. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference on Technologies of Building Cognitive Transport Systems, 30–31 May 2018, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2018. p.15–20. (in Russ.) EDN:XRWWTJ
2. Shatalova N.V., Oreshkina A.D. Technological principles of intelligent transport systems. *Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference on the NTI Avtonet "Promising Transport Technologies", 8 July 2025, Yekaterinburg, Russian Federation*. Moscow: Moscow Polytechnic University Publ.; 2025. p.159–164. (in Russ.) EDN:LBQFJM
3. Bondarenko I.B., Pelikh D.A. Design the Architecture of a Multi-Agent System in Solving Specific Urban Management Tasks. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2025;2:48–51. (in Russ.) EDN:DRPBFF
4. Konovalova T.V., Nadiryana S.L., Izyumsky A.A., Kotsurba S.V. Elements of Road Infrastructure and Their Impact on Road Safety. *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*. 2022;12(2):49–68. (in Russ.) DOI:10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68. EDN:OKEKTL
5. Ziarmand A.N., Khakhanov V.I. Models and Methods of Transport Monitoring and Control. *Radioelectronics & Informatics*. 2016;3:64–80. (in Russ.)
6. Elkin D.M., Vyatkin V.V. Towards IoT in Traffic Control: Review of Existing Methods of Road Traffic Regulation. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019;5(207):100–113. (in Russ.) DOI:10.23683/2311-3103-2019-5-100-113. EDN:XZWTPC
7. Gorodetskii V.I., Karsaev O.V., Samoilov V.V., Serebryakov S.V. Development Tools for Open Agent Networks. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008;47(3):429–446. DOI:10.1134/S1064230708030131. EDN:LLHPLJ
8. Rodzina L.S. Applied Multi-Agent Systems. Programming on the JADE Platform. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co; 2011. 174 p. (in Russ.)
9. Masloboev A.V. Software Agents Interaction Models and Algorithms in the Virtual Business Environment of Innovation Development. *Vestnik of MSTU. Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2009;12(2):224–234. (in Russ.) EDN:KPYRAD
10. Dushkin R.V. Multi-Agent Systems for Cooperative ITS. *Trends and Management*. 2021;1:42–50. (in Russ.) DOI:10.7256/2454-0730.2021.1.34169. EDN:ZNESUF
11. Shepelev V.D., Almetova Z.V., Moor A.D., Bersteneva V.I. Performance Optimization of Adaptive Traffic Lights Using Machine Vision. *Bulletin of South Ural State University, Series "Economics and Management"*. 2020;14(1):189–196. (in Russ.) DOI:10.14529/em200119. EDN:YWEJSZ
12. Rasilmukhamedov M.M., Tashmetov K.Sh. Optimization of traffic flow control at intersections using neural network. *Intellectual Technologies on Transport*. 2023;S1:92–96. (in Russ.) EDN:YBZSPQ
13. Povaliaev N.D., Krylatov A.Yu., Shatalova N.V. Methods of cluster analysis of road networks for bottleneck detection and traffic optimization. *T-Comm*. 2025;19(7):34–40. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2025-19-7-34-40. EDN:AALGBX
14. Akopov A.S., Zaripov E.A., Melnikov A.M. Adaptive Control of Transportation Infrastructure in an Urban Environment Using a Real-Coded Genetic Algorithm. *Business Informatics*. 2024;18(2):48–66. DOI:10.17323/2587-814X.2024.2.48.66. EDN:XSDWU
15. Haupt R.L., Haupt S.E. *Practical genetic algorithms*. Wiley; 2004.
16. Arkhangel'sky A. Modeling the Car Motion in a Transport Flow on a Computer. *Automation and modeling in design and management*. 2020;1(7):26–31. (in Russ.) DOI:10.30987/2658-6436-2020-1-26-31. EDN:EBPRMN

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 09.06.2026


The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 18.03.2026; accepted for publication 09.06.2026

Информация об авторах:

**ПЕЛИХ
Дмитрий Александрович**

ассистент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0001-6919-4822>

**ШАТАЛОВА
Наталья Викторовна**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
 <https://orcid.org/0000-0002-9781-067X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.056

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-139-150>

EDN:CMCINU



Метод адаптивного выбора режима информационного обмена в системе связи для оптимизации управления группировкой робототехнических комплексов при кибервоздействиях

✉ Алексей Владимирович Рабин¹, rabin.av@sut.ru

Валерий Алексеевич Липатников², lipatnikovanl@mail.ru

Илья Андреевич Андреев², andreev.ilia.1984@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Актуальность исследования обусловлена развитием концепции *Internet of Robotic Things*, в рамках которой робототехнические устройства рассматриваются как сетевые интеллектуальные объекты, взаимодействующие с облачными, периферийными, сенсорными и управляющими компонентами.




Цель работы. Целью работы является разработка метода адаптивного выбора режима информационного обмена в системе связи группировки робототехнических комплексов, обеспечивающего повышение устойчивости управления при кибервоздействиях и деградации каналов связи. **Решение.** В статье предложен метод адаптивного выбора режима информационного обмена в системе связи для оптимизации управления группировкой робототехнических комплексов при кибервоздействиях и деградации каналов связи. **Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в разработке метода адаптивного выбора режима информационного обмена, основанного на совместной оценке критериев доступности, целостности, своевременности доставки сообщений и операционной связности. **Вычислительный эксперимент,** выполненный для группировки из 20 робототехнических комплексов, показал, что при комбинированном кибервоздействии предложенный метод обеспечивает доступность доставки сообщений 0,804, целостность сообщений 0,988, снижает количество принятых ложных сообщений до 1932 и уменьшает среднее число переключений режима до 6,3 за один прогон. **Практическая значимость.** Практическая значимость результатов заключается в возможности применения разработанного метода при проектировании и совершенствовании систем связи управления группировками робототехнических комплексов, функционирующих в условиях кибервоздействий и деградации каналов связи.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, группировка робототехнических комплексов, система связи управления, информационный обмен, кибервоздействие, доступность, целостность данных, поддержка передачи, адаптивный выбор режима, multi-robot systems, *Internet of Robotic Things*

Ссылка для цитирования: Рабин А.В., Липатников В.А., Андреев И.А. Метод адаптивного выбора режима информационного обмена в системе связи для оптимизации управления группировкой робототехнических комплексов при кибервоздействиях // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 139–150. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-139-150. EDN:CMCINU

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-139-150>
EDN:CMCIHU

Adaptive Selection Method for the Information Exchange Mode in a Communication System for Optimizing Control of a Robotic Complex Group under Cyber Impacts

 **Aleksey V. Rabin**¹✉, rabin.av@sut.ru
 **Valery A. Lipatnikov**², lipatnikovanl@mail.ru
 **Ilya A. Andreev**², andreev.ilia.1984@mail.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Annotation

Relevance. The relevance of this study is further enhanced by the evolution of the Internet of Robotic Things (IoRT) concept, in which robotic devices operate as intelligent networked entities interacting with cloud, edge, sensing, and control components. **Purpose.** The purpose of this study is to develop an adaptive information exchange mode selection method for communication systems of robotic system groups to improve control resilience under cyberattacks and communication channel degradation. **Methods.** The paper proposes an adaptive information exchange mode selection method for optimizing the control of robotic system groups under cyberattacks and communication channel degradation. **Scientific novelty.** The scientific novelty of the proposed approach lies in the development of an adaptive information exchange mode selection method based on the joint assessment of communication availability, message integrity, delivery timeliness, and operational connectivity. **A computational experiment** involving a group of 20 robotic systems demonstrated that, under combined cyberattacks, the proposed method achieved a message delivery availability of 0.804 and a message integrity of 0.988, reduced the number of accepted false messages to 1,932, and decreased the average number of operating mode switches to 6.3 per simulation run.

Practical significance. The practical significance of the proposed method lies in its applicability to the design and enhancement of communication systems for robotic system groups operating under cyberattacks and communication channel degradation.

Keywords: robotic complex; robotic complex group; communication control system; information exchange; cyber impact; availability; data integrity; delivery delay; adaptive mode selection; multi-robot systems; Internet of Robotic Things

For citation: Rabin A.V., Lipatnikov V.A., Andreev I.A. Adaptive Selection Method for the Information Exchange Mode in a Communication System for Optimizing Control of a Robotic Complex Group under Cyber Impacts. Proceedings of Telecommunication Universities. 2026;12(3):139–150. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-139-150. EDN:CMCIHU

Введение

Развитие робототехнических комплексов (РТК) и их объединение в группировки приводит к усложнению систем связи управления, обеспечивающих передачу управляющих команд, телеметрии

и служебной информации между пунктом управления, ретрансляционными узлами и отдельными робототехническими средствами. В отличие от одиночных робототехнических платформ, группировка РТК функционирует как распределенная ки-

берфизическая система, в которой результат выполнения задачи зависит от состояния отдельных устройств и от качества информационного обмена между ними. Актуальность задачи усиливается развитием концепции IoRT (*аббр. от англ. Internet of Robotic Things*), где робототехнические устройства рассматриваются как сетевые интеллектуальные объекты, взаимодействующие с облачными, периферийными, сенсорными и управляющими компонентами [1–4]. Такая интеграция расширяет функциональные возможности группировок, но одновременно увеличивает число потенциальных уязвимостей и поверхность кибервоздействий.

Исследования коммуникаций в многороботных системах показывают, что эффективность группового поведения зависит от топологии сети, пропускной способности каналов, задержек, потерь сообщений и своевременности доставки данных [5]. Поэтому система связи управления не может рассматриваться только как среда передачи данных: она непосредственно влияет на согласование действий, устойчивость функционирования и безопасность группировки.

Для робототехнических и киберфизических систем характерны угрозы несанкционированного доступа (НСД), подмены данных, модификации сообщений, сетевых атак, отказа в обслуживании, воздействия на сенсорные данные и нарушения управляющих контуров [6–9]. В контексте группировки РТК такие воздействия имеют не только информационные, но и функциональные последствия, поскольку задержка или искажение управляющей команды может привести к рассогласованию действий и снижению вероятности успешного выполнения групповой задачи.

В качестве базовых свойств информационной безопасности (ИБ) обычно рассматриваются конфиденциальность, целостность и доступность информации [10]. Для системы связи управления группировкой РТК эти свойства приобретают прикладную интерпретацию: доступность связана с доставкой команд и телеметрии, целостность – с отсутствием подмены или модификации сообщений, а конфиденциальность – с предотвращением НСД к управляющей и служебной информации. Дополнительно существенную роль играет своевременность доставки, поскольку корректное сообщение может утратить прикладную ценность при чрезмерной задержке.

Несмотря на значительное число работ по кибербезопасности (КБ) робототехнических систем, устойчивому управлению, обнаружению атак и коммуникациям в многороботных системах (группировках РТК), недостаточно проработанной остается задача выбора режима информационного обмена при изменяющемся профиле нарушения. В существующих работах акцент обычно делается либо

на обнаружении конкретного класса атак, либо на устойчивом управлении при заданной модели отказов, либо на оптимизации коммуникаций без явной связи с профилем нарушения КБ [11–20].

В рассматриваемой постановке выбор режима информационного обмена является элементом замкнутого цикла управления системой связи группировки РТК при кибервоздействиях. Такой цикл включает сбор сведений о состоянии каналов и сообщениях, расчет критериев доступности, целостности, своевременности и операционной связности, определение профиля нарушения, выбор требуемого режима обмена, проверку устойчивости принятого решения и последующее применение выбранного режима на следующем интервале наблюдения. В отличие от статической организации обмена, данный цикл позволяет связывать наблюдаемое ухудшение состояния связи с конкретным управляющим воздействием: усилением контроля целостности, резервированием передачи, децентрализацией взаимодействия или ограничением объема трафика. Поэтому задача выбора режима информационного обмена рассматривается не как вспомогательная настройка сети, а как самостоятельный процесс управления устойчивостью системы связи группировки РТК.

Целью работы является разработка метода, который по значениям критериев состояния связи выбирает режим информационного обмена и ограничивает число необоснованных переключений. Для достижения цели решаются задачи формализации модели системы связи, определения критериев оценки обмена, разработки правила адаптивного выбора режима по профилю нарушения и экспериментального сравнения предлагаемого метода с базовыми схемами.

2. Анализ существующих работ и постановка задачи

Исследования по тематике статьи можно разделить на несколько групп: коммуникации в группировке РТК, технологии IoRT, ИБ робототехнических и киберфизических систем, устойчивое распределенное управление, а также методы обнаружения вторжений. Их сопоставление приведено в таблице 1.

В многороботных системах обмен данными поддерживает координацию, передачу состояний и выполнение распределенных алгоритмов. В [5] подчеркивается, что для таких систем характерны динамическая топология, ограничения радиоресурса, интерференция и неполнота информации. Эти факторы делают актуальной не только маршрутизацию сообщений, но и адаптацию режима обмена к текущему состоянию сети.

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление направлений исследований с задачами статьи

TABLE 1. Comparison of Research Areas with the Objective of the Article

Направление	Основное содержание работ	Ограничение для рассматриваемой задачи
Коммуникации в группировках РТК [5]	– топология – пропускная способность – задержки – обмен состояниями – распределенные алгоритмы	Недостаточно рассматривается выбор режима обмена по профилю кибервоздействия
IoT [1–4]	– архитектуры – протоколы – облачные и периферийные вычисления – безопасность IoT	Преимущественно анализируются технологии и общие проблемы безопасности
КБ роботов и CPS [6–9]	– уязвимости – деревья атак – оценка безопасности – защита роботизированных CPS	Акцент на оценке уязвимостей и атак, а не на оперативном переключении режима обмена
Устойчивое управление многороботными системами [11, 18–20]	– resilient coordination – задержки – отказоустойчивость – успешность миссий	Информационный обмен часто является условием работы алгоритма, а не объектом управления
Атаки на многороботные и многоагентные системы [12–17]	– deception – DoS – false data injection – adversarial perception – communication jamming	Обычно рассматриваются отдельные классы воздействий или отдельные контуры управления.
IDS для IoT [21, 22]	– классификация нормального и аномального поведения – ML/DL-подходы	IDS-слой не определяет режим организации информационного обмена

Работы по IoT [1–4] показывают, что робототехнические устройства все чаще функционируют как сетевые интеллектуальные объекты. При этом возрастают требования к безопасности обмена, защите данных и устойчивости к сетевым воздействиям. Однако большинство таких работ носит обзорный или архитектурный характер и не решает задачу выбора режима информационного обмена в динамике.

В работах по КБ роботов и CPS [6–9] систематизируются уязвимости данных, программного обеспечения, сетевого взаимодействия и аппаратных компонентов. Отдельные исследования предлагают автоматизированную оценку безопасности, деревья атак и моделирование атак. Эти подходы важны для анализа угроз, но не определяют, какой режим обмена следует использовать при конкретном сочетании потерь, задержек и нарушений целостности.

Наиболее близкими являются исследования устойчивого управления и состязательных сред

[11–20]. Например, deception-атаки связываются с нарушением целостности, а DoS-атаки – с нарушением доступности [12]. Отдельно рассматриваются атаки на коммуникационные связи [13], прерывистая связь [14], semantic attacks [15], adversarial perception [16], отказоустойчивая локализация [17], задержки связи [19] и обмен критической информацией [20]. Эти работы обосновывают набор нарушений, учитываемых в настоящей статье: снижение доступности, нарушение целостности, рост задержек и ухудшение операционной связности.

Отдельное значение для рассматриваемой задачи имеют методы обнаружения вторжений и аномалий в сетях Интернета вещей. В работах [21, 22] анализируются современные подходы к построению систем обнаружения вторжений на основе методов машинного и глубокого обучения, предназначенные для выявления нормального и аномального поведения сетевых узлов. Такие методы могут использоваться как источник информации о признаках кибервоздействия, однако сами по себе они, как правило, не определяют режим организации информационного обмена. В настоящей работе результаты обнаружения или оценки аномальности рассматриваются не как конечное управляющее решение, а как возможная входная информация для формирования профиля нарушения и последующего выбора режима обмена.

В отечественных работах также рассматриваются смежные задачи динамического обнаружения киберугроз, обработки результатов сетевого контроля и поддержки принятия решений при управлении сетями связи. В [23] предложен метод динамического обнаружения киберугроз в распределенных системах Интернета вещей на основе генеративных моделей, ориентированный на анализ поведения узлов и выявление аномалий. В [24] рассматривается обработка результатов сетевого контроля при поддержке принятия решений администратора безопасности информации. В [25] исследуется метод поддержки принятия решения при управлении сетью связи на основе нейросетевых технологий. Указанные работы подтверждают актуальность интеллектуальной обработки сетевых состояний и поддержки принятия решений, однако в них не решается задача выбора режима информационного обмена в системе связи управления группировкой РТК по совокупности критериев доступности, целостности, своевременности и операционной связности.

Дополнительно вопросы навигации, кооперативного обследования, защиты робототехнических и беспилотных групп, а также сетевого обнаружения вторжений рассматриваются в современных обзорах и исследованиях [26–32]. Эти источники подтверждают актуальность учета ограничений

связи, киберугроз и устойчивости обмена при проектировании групповых робототехнических систем.

Таким образом, существующие исследования раскрывают отдельные аспекты проблемы, но недостаточно рассматривают выбор режима информационного обмена в системе связи управления группировкой РТК при изменяющемся профиле нарушения. Под профилем нарушения далее понимается совокупность признаков, характеризующих доступность доставки сообщений, целостность принимаемых данных, своевременность доставки и операционную связность группировки.

Постановка задачи заключается в разработке и экспериментальной оценке метода, который на каждом интервале наблюдения оценивает состояние информационного обмена и выбирает один из режимов: штатный, защищенный, резервированный, децентрализованный или ограниченный. Выбор должен учитывать профиль нарушения и ограничивать число необоснованных переключений режима.

3. Модель и метод адаптивного выбора режима информационного обмена

3.1. Модель системы связи управления

Систему связи управления группировкой РТК представим динамическим графом:

$$G(t) = \langle V, E(t) \rangle,$$

где V – множество узлов; $E(t)$ – множество каналов связи, доступных на момент времени t .

Множество узлов включает пункт управления v_c , множество ретрансляционных узлов V_r и множество робототехнических комплексов V_b :

$$V = \{v_c\} \cup V_r \cup V_b.$$

$$e_{ij}(t)p_{ij}^{loss}(t)d_{ij}(t)s_{ij}(t).$$

Каждый канал характеризуется вероятностью потери сообщения, задержкой передачи и состоянием доступности. В рассматриваемых сценариях DoS-подобное воздействие приводит к росту потерь и отказам каналов, задерживающее воздействие увеличивает время доставки, а нарушение целостности связано с появлением ложных или модифицированных сообщений.

Для маршрута $P_c, k(t)$ от пункта управления или ретрансляционного узла к k -му РТК вероятность доставки и задержка определяются выражениями:

$$P_{deliv, k}(t) = \prod_{e_{ij} \in P_c, k(t)} (1 - p_{ij}^{loss}(t)),$$

$$D_{k(t)} = \sum_{e_{ij} \in P_c, k(t)} d_{ij}(t).$$

Эти величины используются при расчете критериев доступности и своевременности передачи управляющих сообщений.

3.2. Критерии оценки состояния обмена

Состояние информационного обмена описывается вектором критериев:

$$K(t) = \langle K_A(t), K_I(t), K_T(t), K_G(t) \rangle.$$

Критерий доступности определяется как доля доставленных управляющих сообщений:

$$K_A(t) = \frac{N_{deliv}(t)}{N_{sent}(t)}.$$

Критерий целостности учитывает ложные или модифицированные сообщения, ошибочно принятые системой:

$$K_I(t) = 1 - \frac{N_{false}(t)}{N_{recv}(t)}.$$

Критерий своевременности рассчитывается по средней задержке доставки управляющих сообщений:

$$K_T(t) = 1, \text{ если } \bar{D}(t) \leq D_{ok}; 1 - \frac{\bar{D}(t) - D_{ok}}{D_{crit} - D_{ok}},$$

если $D_{ok} < \bar{D}(t) < D_{crit}$; 0, если $\bar{D}(t) \geq D_{crit}$.

Критерий операционной связности определяется как доля РТК, для которых существует пригодный маршрут связи:

$$K_G(t) = \frac{N_{conn}(t)}{N}.$$

Маршрут считается пригодным, если вероятность доставки по нему не ниже заданного порога, а задержка не превышает допустимого значения. Такая трактовка отличает операционную связность от простой топологической связности графа.

3.3. Режимы информационного обмена

Вводится множество режимов информационного обмена (их назначение приведено в таблице 2):

$$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}.$$

ТАБЛИЦА 2. Режимы информационного обмена

TABLE 2. Information Exchange Modes

Режим	Название	Назначение	Ограничение
q_0	штатный	минимальная задержка и служебная нагрузка в нормальных условиях	низкая устойчивость к кибервоздействиям
q_1	защищенный	усиленная проверка целостности и подлинности сообщений	рост задержки и служебного трафика
q_2	резервированный	дублирование сообщений или использование резервных маршрутов	рост сетевой нагрузки

q_3	децентрализованный	снижение зависимости от пункта управления	усложнение координации
q_4	ограниченный	передача преимущественно критически важных сообщений	уменьшение полноты обмена

3.4. Правило выбора режима

На каждом интервале наблюдения формируется профиль нарушения $R(t)$, включающий признаки снижения доступности, целостности, своевременности и операционной связности.

Требуемый режим $q^*(t)$ определяется правилом приоритетов:

$$\begin{aligned}
 q^*(t) &= q_1, \text{ если } K_{I(t)} < K_I^{\min}, \\
 &q_3, \text{ если } K_{G(t)} < K_G^{\min}, \\
 &q_4, \text{ если } K_{A(t)} < K_A^{\text{crit}} \text{ и } K_{T(t)} < K_T^{\text{crit}}, \\
 &q_2, \text{ если } K_{A(t)} < K_A^{\min}, \\
 &q_4, \text{ если } K_{T(t)} < K_T^{\min}, \\
 &q_0 \text{ иначе.}
 \end{aligned}$$

Приоритет нарушения целостности обусловлен тем, что принятие ложной или модифицированной управляющей команды может привести к некорректным действиям РТК. Снижение операционной связности требует частичной децентрализации, снижение доступности – резервирования, а рост задержек и перегрузка – ограничения объема передаваемого трафика.

Для уменьшения числа необоснованных переключений используется гистерезис. Переключение выполняется только в том случае, если требуемый режим сохраняется не менее H последовательных интервалов наблюдения:

$$\begin{aligned}
 q(t) &= q^*(t), \\
 \text{если } q^*(t) &= q^*(t-1) = \dots = q^*(t-H+1), \\
 \text{иначе } q(t) &= q(t-1).
 \end{aligned}$$

$$H = 5$$

В вычислительном эксперименте параметр гистерезиса H принят равным 5 шагам. Обобщенный алгоритм метода приведен в таблице 3.

Структура имитационной модели представлена на рисунке 1, обобщенный алгоритм адаптивного выбора режима информационного обмена – на рисунке 2.

ТАБЛИЦА 3. Основные этапы метода адаптивного выбора режима

TABLE 3. Main Stages of the Adaptive Mode Selection Method

Этап	Действие
1	Сбор данных о доставке сообщений, задержках, ложных сообщениях и состоянии каналов
2	Расчет критериев K_A, K_I, K_T, K_G
3	Формирование профиля нарушения $R(t)$
4	Определение требуемого режима $q^*(t)$ по правилу приоритетов
5	Проверка условия гистерезиса
6	Выбор $q(t)$ и применение режима на следующем интервале наблюдения

Представленный алгоритм вводит в цикл управления системой связи несколько дополнительных процессов по сравнению со статической схемой обмена. К ним относятся расчет векторной оценки состояния информационного обмена, формирование профиля нарушения, приоритетный выбор режима по характеру нарушения и проверка гистерезиса перед переключением. За счет этого смена режима выполняется не при единичном отклонении одного показателя, а при устойчивом подтверждении соответствующего состояния системы связи. Такой подход снижает вероятность частых переключений режима при кратковременных флуктуациях задержек, потерь сообщений или оценок целостности.

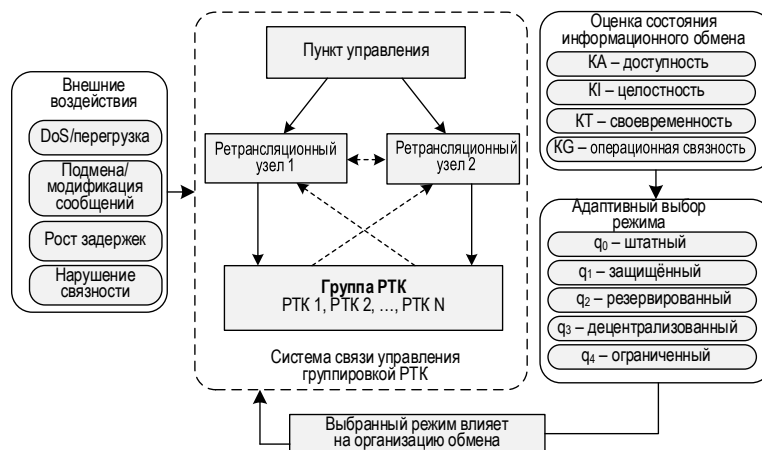


Рис. 1. Структура имитационной модели системы связи управления группировкой РТК
 Fig. 1. Structure of the Simulation Model of the Communication System for Robotic Group Control

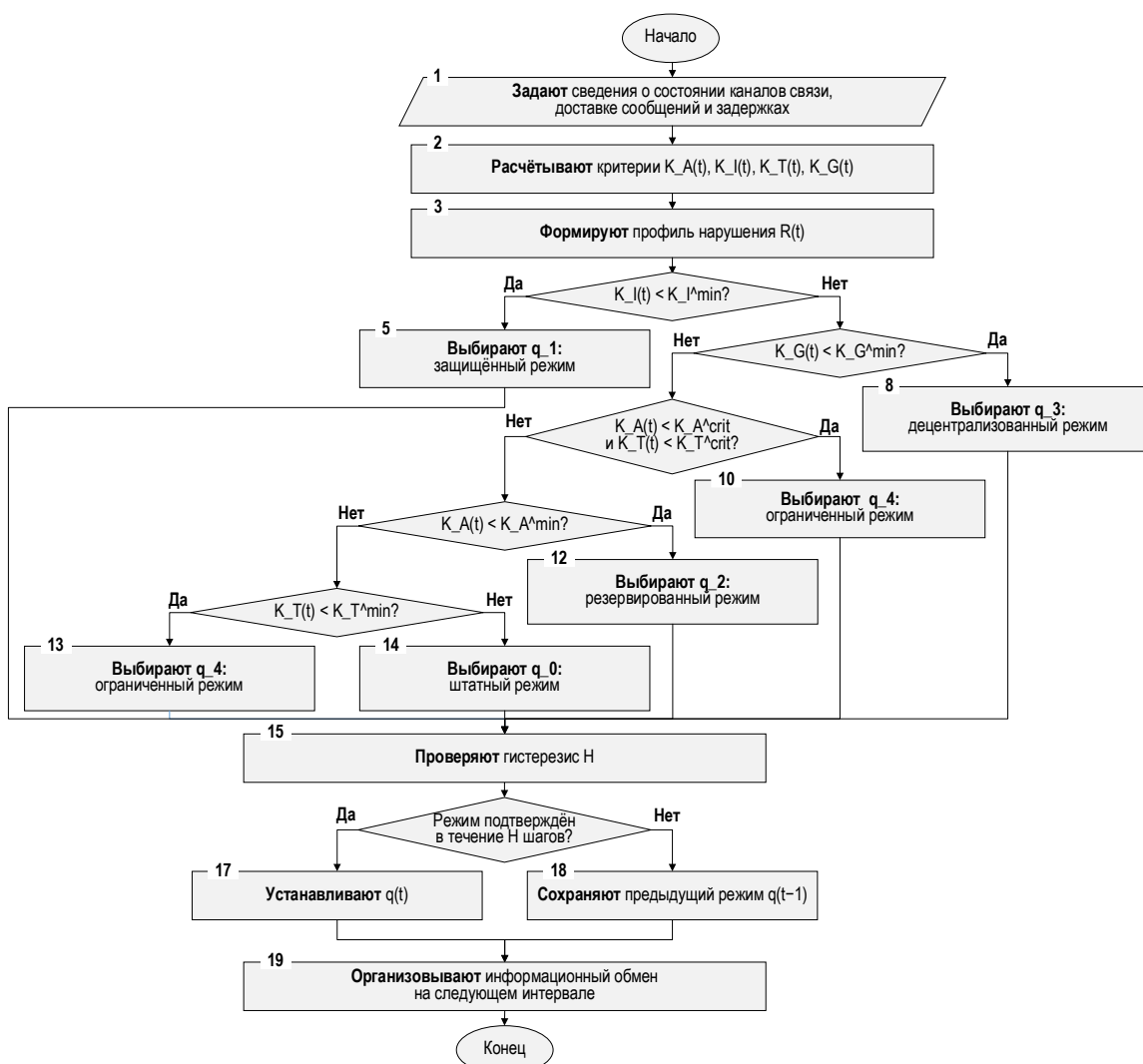


Рис. 2. Алгоритм адаптивного выбора режима информационного обмена

Fig. 2. Algorithm for Adaptive Selection of the Information Exchange Mode

4. Вычислительный эксперимент

4.1. Условия моделирования

Для проверки работоспособности метода проведен вычислительный эксперимент на имитационной модели системы связи управления. Моделирование не включает полную физическую динамику РТК, поскольку объектом исследования является организация информационного обмена. На каждом шаге пункт управления формировал управляющие сообщения для всех РТК; для каждого сообщения определялись возможность доставки, задержка и вероятность потери.

В эксперименте рассматривалась группировка из одного пункта управления, трех ретрансляционных узлов и двадцати РТК. Для каждого сценария и метода выполнялось 30 независимых прогонов по 300 шагов. Основные параметры приведены в таблице 4. Рассматривались пять сценариев: нормальное функционирование, DoS-подобная деградация

каналов, подмена или модификация сообщений, рост задержек и комбинированное воздействие. Комбинированный сценарий включал последовательность интервалов: 0–50 – нормальное состояние; 50–120 – DoS-подобная деградация; 120–180 – подмена сообщений; 180–240 – рост задержек; 240–300 – комбинированное воздействие.

Предлагаемый метод сравнивался со статической схемой, резервированием по отказу, пороговым методом без гистерезиса и пороговым методом с гистерезисом. Для оценки использовались доступность K_A , своевременность K_T , целостность K_I , операционная связность K_G , средняя задержка \bar{D} , суммарное число принятых ложных сообщений N_{false} , среднее число переключений режима N_{sw} и средний служебный трафик O_{tr} .

ТАБЛИЦА 4. Основные параметры вычислительного эксперимента

TABLE 4. Main Parameters of the Computational Experiment

Параметр	Значение
Число РТК	20
Число ретрансляционных узлов	3
Длительность одного прогона	300 шагов
Число независимых прогонов	30
Допустимая задержка D_{ok}	80 мс
Критическая задержка D_{crit}	350 мс
Параметр гистерезиса H	5 шагов
Минимальная вероятность пригодного маршрута	0,35

4.2. Результаты и обсуждение

Основные результаты для комбинированного сценария приведены в таблице 5. Этот сценарий используется как основной, поскольку отражает изменение профиля нарушения во времени.

Статическая схема имеет минимальную служебную нагрузку, но демонстрирует наихудшие значения доступности и числа принятых ложных сообщений. Это связано с отсутствием реакции на изменение состояния каналов и появление модифицированных сообщений. Резервирование по отказу повышает доставку команд, но практически не решает задачу снижения ложных сообщений и сопровождается большим числом переключений.

Пороговый метод обеспечивает рост доступности и целостности, однако из-за отсутствия гистерезиса выполняет в среднем 151,3 переключения режима за прогон. Пороговый метод с гистерезисом снижает число переключений и имеет наибольшее значение $K_A = 0,818$, но сопровождается максимальным служебным трафиком и уступает предлагаемому методу по целостности, задержке и числу принятых ложных сообщений.

$$K_A = 0,804, K_I = 0,988, N_{false} = 1932, N_{sw} = 6,3.$$

Предлагаемый метод обеспечил $K_A = 0,804$, что близко к результатам пороговых схем, но при этом

показал наилучшее значение $K_I = 0,988$, минимальное число принятых ложных сообщений $N_{false} = 1932$ и минимальное число переключений среди адаптивных схем $N_{sw} = 6,3$. Средняя задержка составила 158,30 мс, что ниже, чем у пороговых методов.

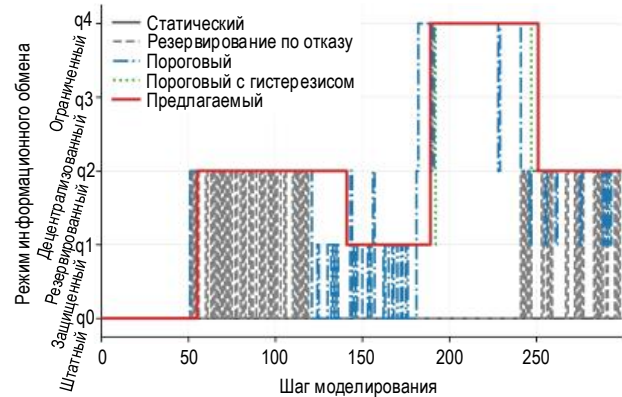
Рис. 3. Динамика выбора режима информационного обмена $q(t)$ при комбинированном кибервоздействии

Fig. 3. Dynamics of Information Exchange Mode Selection under Combined Cyber Impact

По сравнению со статической схемой предложенный метод повысил доступность доставки с 0,689 до 0,804 и снизил число принятых ложных сообщений с 5038 до 1932, т. е. примерно на 61,7%. По сравнению с пороговым методом без гистерезиса он уменьшил число переключений со 151,3 до 6,3 за прогон и снизил число принятых ложных сообщений с 2590 до 1932. По сравнению с пороговой схемой с гистерезисом предлагаемый метод несколько уступил по доступности, но показал лучшие значения по целостности, задержке, числу ложных сообщений, числу переключений и служебному трафику.

Изменение критериев доступности и целостности при комбинированном воздействии приведено на рисунке 4, а суммарное число принятых ложных сообщений и среднее число переключений режима – на рисунке 5.

ТАБЛИЦА 5. Сравнительные результаты методов при комбинированном кибервоздействии

TABLE 5. Comparative Results of the Methods under Combined Cyber Impact

Метод	K_A	K_T	K_I	K_G	D_{cp} , мс	N_{false}	N_{sw}	O_{tr}
Статический	0,689	0,704	0,960	0,978	154,78	5038	0,0	20,00
Резервный	0,757	0,689	0,968	0,989	158,88	4579	115,9	31,14
Пороговый	0,807	0,677	0,984	0,984	163,22	2590	151,3	41,61
Порог.+гист.	0,818	0,684	0,986	0,994	162,05	2182	8,3	43,25
Предлагаемый	0,804	0,698	0,988	0,992	158,30	1932	6,3	38,93

Примечание: Порог.+гист. – пороговый метод с гистерезисом

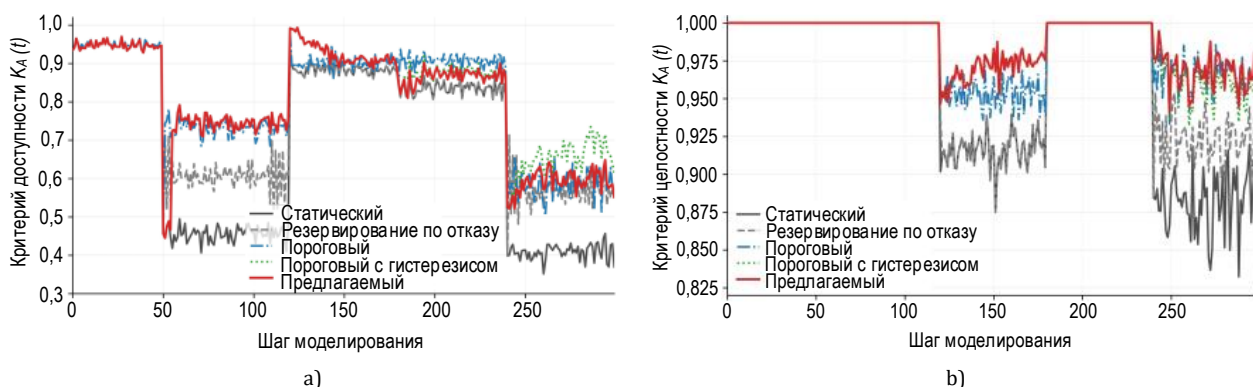


Рис. 4. Изменение при комбинированном воздействии критериев: а) доступности $K_A(t)$; б) целостности $K_I(t)$

Fig. 4. Changes in Criteria under Combined Impact: (a) Availability; (b) Integrity

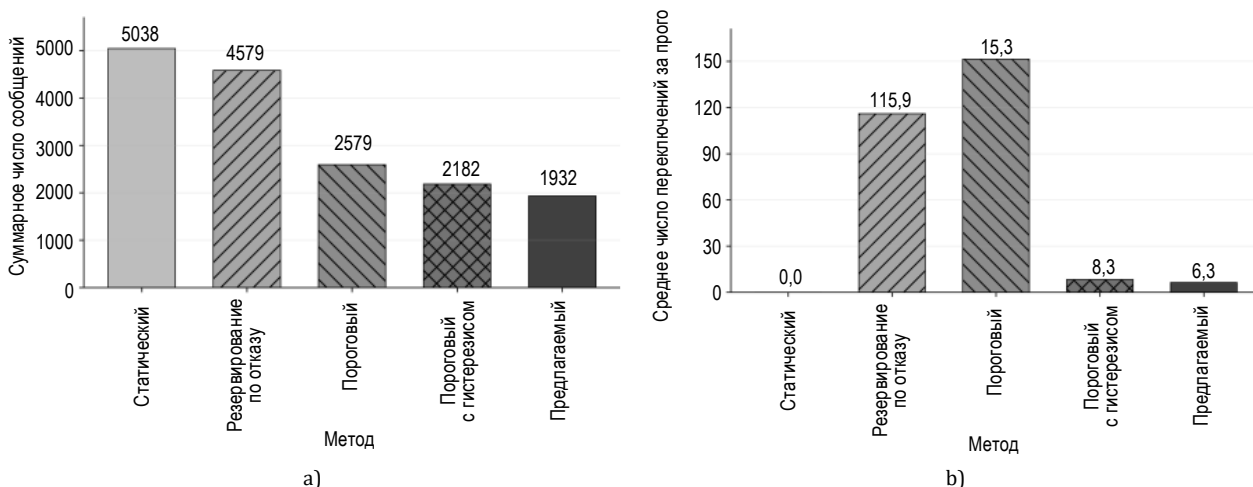


Рис. 5. Суммарное число принятых ложных сообщений при комбинированном воздействии (а) и среднее число переключений режима информационного обмена за один прогон (б)

Fig. 5. Total Number of Accepted False Messages under Combined Impact (a) and Average Number of Information Exchange Mode Switches per Run (b)

Следовательно, предлагаемый метод не максимизирует один отдельный показатель, а обеспечивает более сбалансированное управление информационным обменом. Это важно для системы связи управления группировкой РТК, где чрезмерное резервирование, частые переключения режима и избыточный служебный трафик также могут снижать устойчивость функционирования.

Заключение

В работе рассмотрена задача адаптивного выбора режима информационного обмена в системе связи для оптимизации управления группировкой РТК при кибервоздействиях и деградации каналов связи. Предложена модель системы связи в виде динамического графа, включающего пункт управления, ретрансляционные узлы и РТК. Для оценки состояния обмена использованы критерии доступности, целостности, своевременности доставки и операционной связности.

Разработан метод адаптивного выбора режима информационного обмена по профилю нарушения. В зависимости от состояния критериев выбирается штатный, защищенный, резервированный, децентрализованный или ограниченный режим. Для уменьшения числа необоснованных переключений используется механизм гистерезиса.

Вычислительный эксперимент показал, что при комбинированном воздействии предлагаемый метод обеспечивает более сбалансированное управление обменом по сравнению с базовыми схемами. Он повысил доступность доставки управляющих сообщений по сравнению со статической схемой, снизил число принятых ложных сообщений и существенно уменьшил число переключений по сравнению с пороговым методом без гистерезиса. При этом преимущество метода заключается не в максимизации одного отдельного показателя, а в достижении компромисса между доступностью, целостностью, своевременностью, операционной связностью и стабильностью переключения режимов.

Ограничением исследования является использование имитационной модели, в которой не учитывались полная физическая динамика РТК, особенности конкретных радиопrotocolов, криптографические задержки реальных средств защиты и влияние выбранного режима обмена на выполне-

ние прикладной миссии. Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с учетом мобильности узлов, неоднородности РТК, энергоограничений, реальных протоколов межроботного обмена и интеграции метода с модулями обнаружения аномалий и вторжений.

Список источников

1. Kabir H., Tham M.-L., Chang Y. C. Internet of Robotic Things for Mobile Robots: Concepts, Technologies, Challenges, Applications, and Future Directions // *Digital Communications and Networks*. 2023. Vol. 9, No. 6. P. 1265–1290. DOI: 10.1016/j.dcan.2023.05.006.
2. Krejčí J., Babiuch M., Suder J., Kryš V., Bobovský Z. Internet of Robotic Things: Current Technologies, Challenges, Applications, and Future Research Topics // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 3. Article 765. DOI: 10.3390/s25030765.
3. Rahim M. A., Rokonzaman M., Alqumsan A. A., Arogbonlo A., Islam M. Z., Trinh H., Islam M. S. An Intelligent and Secure Internet of Robotic Things: A Review and Conceptual Framework // *Internet of Things*. 2025. Vol. 33. Article 101684. DOI: 10.1016/j.iot.2025.101684.
4. Zafir E. I., Akter A., Islam M. N., Hasib S. A., Islam T., Sarker S. K., Muyeen S. M. Enhancing Security of Internet of Robotic Things: A Review of Recent Trends, Practices, and Recommendations with Encryption and Blockchain Techniques // *Internet of Things*. 2024. Vol. 28. Article 101357. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101357.
5. Gelis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-Robot Systems // *Current Robotics Reports*. 2022. Vol. 3. P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9.
6. Botta A., Rotbei S., Zinno S., Ventre G. Cyber Security of Robots: A Comprehensive Survey // *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 18. Article 200237. DOI: 10.1016/j.iswa.2023.200237.
7. Tanimu J. A., Abada W. Addressing Cybersecurity Challenges in Robotics: A Comprehensive Overview // *Cyber Security and Applications*. 2025. Vol. 3. Article 100074. DOI: 10.1016/j.csa.2024.100074.
8. Papoutsakis M., Hatzivasilis G., Michalodimitrakis E., Ioannidis S., Michael M., Savva A., Nikolaou P., Stokkou E., Bozdemir G. SESAME: Automated Security Assessment of Robots and Modern Multi-Robot Systems // *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 5. Article 923. DOI: 10.3390/electronics14050923.
9. Bhardwaj A., Bharany S., Rehman A. U., Tejani G. G., Hussen S. Securing Cyber-Physical Robotic Systems for Enhanced Data Security and Real-Time Threat Mitigation // *EURASIP Journal on Information Security*. 2025. Vol. 2025. Article 1. DOI: 10.1186/s13635-025-00186-7.
10. National Institute of Standards and Technology. The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0. NIST Cybersecurity White Paper 29. Gaithersburg: NIST, 2024. DOI: 10.6028/NIST.CSWP.29.
11. Zhou L., Tokekar P. Multi-Robot Coordination and Planning in Uncertain and Adversarial Environments // *Current Robotics Reports*. 2021. DOI: 10.1007/s43154-021-00046-5.
12. Lee S., Min B.-C. Distributed Control of Multi-Robot Systems in the Presence of Deception and Denial of Service Attacks. arXiv:2102.00098. 2021.
13. Taheri M., Khorasani K., Shames I., Meskin N. Undetectable Cyber Attacks on Communication Links in Multi-Agent Cyber-Physical Systems. arXiv:2009.06173. 2020.
14. Bahrami R., Jafarnejadsani H. Distributed Detection of Adversarial Attacks for Resilient Cooperation of Multi-Robot Systems with Intermittent Communication. arXiv:2410.04547. 2024.
15. Yeke D., et al. Automated Discovery of Semantic Attacks in Multi-Robot Navigation Systems // *Proceedings of the USENIX Security Symposium*. 2025.
16. Bahrami R., Jafarnejadsani H. Multi-Robot Coordination with Adversarial Perception. arXiv:2504.09047. 2025.
17. Tasooji T. K., Parasuraman R. Distributed Fault-Tolerant Multi-Robot Cooperative Localization in Adversarial Environments. arXiv:2507.06750. 2025.
18. Li P., Liu J., Wu Y., Zhou L. Failure-Aware Multi-Robot Coordination for Resilient and Adaptive Target Tracking. arXiv:2508.02529. 2025.
19. Ballotta L., Talak R. Safe Distributed Control of Multi-Robot Systems with Communication Delays // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025. arXiv:2402.09382.
20. Jo D., Kwon Y. Generation of Critical Information and Sharing Mechanism for Multi-Robot Mission Success // *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 146855–146873. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3600319.
21. Kikissagbe B. R., Adda M. Machine Learning-Based Intrusion Detection Methods in IoT Systems: A Comprehensive Review // *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 18. Article 3601. DOI: 10.3390/electronics13183601.
22. Hozouri A., Mirzaei A., Effatparvar M. A Comprehensive Survey on Intrusion Detection Systems with Advances in Machine Learning, Deep Learning and Emerging Cybersecurity Challenges // *Discover Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 5. Article 314. DOI: 10.1007/s44163-025-00578-1.
23. Котенко И.В., Саенко И.Б., Липатников В.А., Андреев И.А. Метод динамического обнаружения киберугроз в распределенных системах Интернета вещей на основе генеративных моделей // *Прикладная информатика*. 2026. Т. 21. № 2. С. 102–118. DOI: 10.37791/2687-0649-2026-21-2-102-118.
24. Липатников В.А., Мелехов К.В. Способ обработки результатов сетевого контроля при поддержке принятия решения администратора безопасности информации. В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 306–310.

25. Липатников В.А., Парфинов В.А. Метод поддержки принятия решения при управлении сетью связи на основе технологии нейронных сетей. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 467-472.
26. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A Survey of Autonomous Robots and Multi-Robot Navigation: Perception, Planning and Collaboration // *Biomimetic Intelligence and Robotics*. 2025. Vol. 5, No. 2. Article 100203. DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
27. Vijay V., Pant K.A., Cho M., Guo Y., Goppert J.M., Hwang I. Range-Based Multi-Robot Integrity Monitoring For Cyberattacks and Faults: An Anchor-Free Approach // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2025. Vol. 10, No. 3.
28. Aouedi O., Vu T.-H., Sacco A., Nguyen D.C., Piamrat K., Marchetto G., Pham Q.-V. A Survey on Intelligent Internet of Things: Applications, Security, Privacy, and Future Directions // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 1238–1292. DOI: 10.1109/COMST.2024.3430368.
29. Wang C., Yu C., Xu X., Gao Y., Yang X., Tang W., Yu S., Chen Y., Gao F., Jian Z., Chen X., Gao F., Zhou B., Wang Y. Multi-Robot System for Cooperative Exploration in Unknown Environments: A Survey. arXiv:2503.07278. 2025.
30. Holdbrook R., Odeyomi O., Yi S., Roy K. Network-Based Intrusion Detection for Industrial and Robotics Systems: A Comprehensive Survey // *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 22. Article 4440. DOI: 10.3390/electronics13224440.
31. Wang X., Zhao Z., Yi L., Ning Z., Guo L., Yu F.R., Guo S. A Survey on Security of UAV Swarm Networks: Attacks and Countermeasures // *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 57, No. 3. Article 74. DOI: 10.1145/3703625.
32. Ceviz O., Sen S., Sadioglu P. A Survey of Security in UAVs and FANETs: Issues, Threats, Analysis of Attacks, and Solutions // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. Vol. 27, No. 5. P. 3227–3265. DOI: 10.1109/COMST.2024.3515051.

References




1. Kabir H., Tham M.-L., Chang Y. C. Internet of Robotic Things for Mobile Robots: Concepts, Technologies, Challenges, Applications, and Future Directions // *Digital Communications and Networks*. 2023. Vol. 9, No. 6. P. 1265–1290. DOI: 10.1016/j.dcan.2023.05.006.
2. Krejčí J., Babiuch M., Suder J., Kryš V., Bobovský Z. Internet of Robotic Things: Current Technologies, Challenges, Applications, and Future Research Topics // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 3. Article 765. DOI: 10.3390/s25030765.
3. Rahim M. A., Rokonzaman M., Alqumsan A. A., Arogbonlo A., Islam M. Z., Trinh H., Islam M. S. An Intelligent and Secure Internet of Robotic Things: A Review and Conceptual Framework // *Internet of Things*. 2025. Vol. 33. Article 101684. DOI: 10.1016/j.iot.2025.101684.
4. Zafir E. I., Akter A., Islam M. N., Hasib S. A., Islam T., Sarker S. K., Mueen S. M. Enhancing Security of Internet of Robotic Things: A Review of Recent Trends, Practices, and Recommendations with Encryption and Blockchain Techniques // *Internet of Things*. 2024. Vol. 28. Article 101357. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101357.
5. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-Robot Systems // *Current Robotics Reports*. 2022. Vol. 3. P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9.
6. Botta A., Rotbei S., Zinno S., Ventre G. Cyber Security of Robots: A Comprehensive Survey // *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 18. Article 200237. DOI: 10.1016/j.iswa.2023.200237.
7. Tanimu J. A., Abada W. Addressing Cybersecurity Challenges in Robotics: A Comprehensive Overview // *Cyber Security and Applications*. 2025. Vol. 3. Article 100074. DOI: 10.1016/j.csa.2024.100074.
8. Papoutsakis M., Hatzivasilis G., Michalodimitrakis E., Ioannidis S., Michael M., Savva A., Nikolaou P., Stokkou E., Bozdemir G. SESAME: Automated Security Assessment of Robots and Modern Multi-Robot Systems // *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 5. Article 923. DOI: 10.3390/electronics14050923.
9. Bhardwaj A., Bharany S., Rehman A. U., Tejani G. G., Hussen S. Securing Cyber-Physical Robotic Systems for Enhanced Data Security and Real-Time Threat Mitigation // *EURASIP Journal on Information Security*. 2025. Vol. 2025. Article 1. DOI: 10.1186/s13635-025-00186-7.
10. National Institute of Standards and Technology. The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0. NIST Cybersecurity White Paper 29. Gaithersburg: NIST, 2024. DOI: 10.6028/NIST.CSWP.29.
11. Zhou L., Tokekar P. Multi-Robot Coordination and Planning in Uncertain and Adversarial Environments // *Current Robotics Reports*. 2021. DOI: 10.1007/s43154-021-00046-5.
12. Lee S., Min B.-C. Distributed Control of Multi-Robot Systems in the Presence of Deception and Denial of Service Attacks. arXiv:2102.00098. 2021.
13. Taheri M., Khorasani K., Shames I., Meskin N. Undetectable Cyber Attacks on Communication Links in Multi-Agent Cyber-Physical Systems. arXiv:2009.06173. 2020.
14. Bahrami R., Jafarnejadsani H. Distributed Detection of Adversarial Attacks for Resilient Cooperation of Multi-Robot Systems with Intermittent Communication. arXiv:2410.04547. 2024.
15. Yeke D., et al. Automated Discovery of Semantic Attacks in Multi-Robot Navigation Systems // *Proceedings of the USENIX Security Symposium*. 2025.
16. Bahrami R., Jafarnejadsani H. Multi-Robot Coordination with Adversarial Perception. arXiv:2504.09047. 2025.
17. Tasooji T. K., Parasuraman R. Distributed Fault-Tolerant Multi-Robot Cooperative Localization in Adversarial Environments. arXiv:2507.06750. 2025.
18. Li P., Liu J., Wu Y., Zhou L. Failure-Aware Multi-Robot Coordination for Resilient and Adaptive Target Tracking. arXiv:2508.02529. 2025.
19. Ballotta L., Talak R. Safe Distributed Control of Multi-Robot Systems with Communication Delays // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025. arXiv:2402.09382.

20. Jo D., Kwon Y. Generation of Critical Information and Sharing Mechanism for Multi-Robot Mission Success // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 146855–146873. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3600319.
21. Kikissagbe B. R., Adda M. Machine Learning-Based Intrusion Detection Methods in IoT Systems: A Comprehensive Review // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 18. Article 3601. DOI: 10.3390/electronics13183601.
22. Hozouri A., Mirzaei A., Effatparvar M. A Comprehensive Survey on Intrusion Detection Systems with Advances in Machine Learning, Deep Learning and Emerging Cybersecurity Challenges // Discover Artificial Intelligence. 2025. Vol. 5. Article 314. DOI: 10.1007/s44163-025-00578-1.
23. Котенко И.В., Саенко И.Б., Липатников В.А., Андреев И.А. Метод динамического обнаружения киберугроз в распределенных системах Интернета вещей на основе генеративных моделей // Прикладная информатика. 2026. Т. 21. № 2. С. 102–118. DOI: 10.37791/2687-0649-2026-21-2-102-118.
24. Липатников В.А., Мелехов К.В. Способ обработки результатов сетевого контроля при поддержке принятия решения администратора безопасности информации. В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 306-310.
25. Липатников В.А., Парфилов В.А. Метод поддержки принятия решения при управлении сетью связи на основе технологии нейронных сетей. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 467-472.
26. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A Survey of Autonomous Robots and Multi-Robot Navigation: Perception, Planning and Collaboration // Biomimetic Intelligence and Robotics. 2025. Vol. 5, No. 2. Article 100203. DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
27. Vijay V., Pant K.A., Cho M., Guo Y., Goppert J.M., Hwang I. Range-Based Multi-Robot Integrity Monitoring For Cyberattacks and Faults: An Anchor-Free Approach // IEEE Robotics and Automation Letters. 2025. Vol. 10, No. 3.
28. Aouedi O., Vu T.-H., Sacco A., Nguyen D.C., Piamrat K., Marchetto G., Pham Q.-V. A Survey on Intelligent Internet of Things: Applications, Security, Privacy, and Future Directions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 1238–1292. DOI: 10.1109/COMST.2024.3430368.
29. Wang C., Yu C., Xu X., Gao Y., Yang X., Tang W., Yu S., Chen Y., Gao F., Jian Z., Chen X., Gao F., Zhou B., Wang Y. Multi-Robot System for Cooperative Exploration in Unknown Environments: A Survey. arXiv:2503.07278. 2025.
30. Holdbrook R., Odeyomi O., Yi S., Roy K. Network-Based Intrusion Detection for Industrial and Robotics Systems: A Comprehensive Survey // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 22. Article 4440. DOI: 10.3390/electronics13224440.
31. Wang X., Zhao Z., Yi L., Ning Z., Guo L., Yu F.R., Guo S. A Survey on Security of UAV Swarm Networks: Attacks and Countermeasures // ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 57, No. 3. Article 74. DOI: 10.1145/3703625.
32. Ceviz O., Sen S., Sadioglu P. A Survey of Security in UAVs and FANETs: Issues, Threats, Analysis of Attacks, and Solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2025. Vol. 27, No. 5. P. 3227–3265. DOI: 10.1109/COMST.2024.3515051.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026; одобрена после рецензирования 24.06.2026; принята к публикации 27.06.2026.

The article was submitted 15.06.2026; approved after reviewing 24.06.2026; accepted for publication 27.06.2026.

Информация об авторах:

- | | |
|---|--|
| РАБИН
Алексей Владимирович | доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 https://orcid.org/0000-0001-5641-0410 |
| ЛИПАТНИКОВ
Валерий Алексеевич | доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 https://orcid.org/0000-0002-3736-4743 |
| АНДРЕЕВ
Илья Андреевич | оператор научной роты Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 https://orcid.org/0009-0007-3617-3439 |

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.



6–9 апреля 2027

СВЯЗЬ

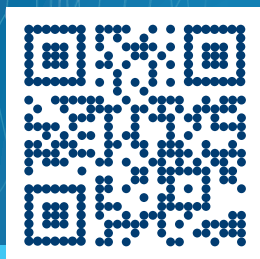
39-я международная
выставка «Информационные
и коммуникационные технологии»

Экспозиция «Навитех» —
«Навигационные системы,
технологии и услуги»

Международная экспозиция
потребительской
электроники



Expo Rating



РЕКЛАМА

12+

www.sviaz-expo.ru

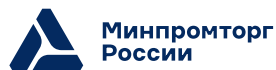
Россия, Москва, ВК «Тимирязев Центр»

При поддержке

Под патронатом

В рамках

Организатор



План издания научной литературы 2026 г., п. 13

Усл.-печ. л.
19

Формат
60×84_{1/8}

Заказ
№ 1663

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

