

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 23, № 4, 2025

Научный журнал выходит шесть раз в год

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в Перечень ВАК Республики Беларусь, а также в базы данных:
CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, НЭБ «КиберЛенинка», РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Лабунов В. А., Гусинский А. В., Певнева Н. А., Родионова В. Н., Касперович М. М., Кашко И. А., Танана О. В. Устойчивость углеволокнутого войлока «Карбопон-В-22» к окислению	5
Хацкевич А. Д., Ланин В. Л. Моделирование тепловых полей индукционного нагрева с концентраторами вихревых токов.....	14
Курочкин А. Е. Способ улучшения формы амплитудно-частотных характеристик резонансных усилителей радиочастоты с двойным автотрансформаторным включением.....	21
Жамойть А. Е., Соловьёв Я. А., Видрицкий А. Э. Расчет интегрального коэффициента поглощения чувствительного элемента неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа.....	29
Мордачев В. И. Радиочастотный электромагнитный фон в хот-спотах 5G	35
Alboun R. F., Albishti A., Ayad H. Designing, Simulating and Analyzing of Microstrip Antenna for Wireless Body Network Using Two Different Types of Substrates (Албоум Р. Ф., Албишти А., Айад Х. Проектирование, моделирование и анализ микрополосковой антенны для беспроводной нательной сети с использованием двух различных типов подложек).....	46
Артемьев В. М., Хмарский П. А., Наумов А. О. Снижение погрешности радиолокационных измерений за счет использования данных мониторинга ионосферы и магнитосферы.....	54
Олехнович В. А., Ильюшенко А. Ф., Анчевский П. С. Контурный термосифон для эффективного охлаждения миниатюрных источников тепловыделения в электронике.....	63
Матвеев В. В., Матвеев И. П. Расчет электрических и магнитных типов волн в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением.....	70
Ван С., Сайманов И. М., Кабулов А. В., Прудник А. М. Архитектура прототипа системы обнаружения аномалий сетевого трафика на основе машинного обучения и визуальной аналитики.....	77
Борисюк А. А., Бондаренко А. В. Моделирование электродинамических и фототермических свойств коллоидных наночастиц серебра, стабилизированных органической оболочкой	85
Григорьева Г. Г., Давыдова Н. С., Васюк В. Е., Шукуров К. Э. Анализ кинематических параметров бега у детей на основе захвата движений	92
Пискун Е. С., Максимчук У. А. Генеративный дизайн веб-ресурсов с учетом влияния цветовых решений на восприятие контента.....	101
Yi Tang, Pertsau D. Yu. Dynamic Relational Graph Modeling for Multi-Agent Trajectory Prediction (Тан И., Перцев Д. Ю. Динамическое графовое моделирование для многоагентного предсказания траектории движения)	109

**Главный редактор
Вадим Анатольевич Богуш,**

д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Редакционная коллегия

Лыньков Л. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Стемпницкий В. Р., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Бойправ О. В., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – ответственный секретарь редколлегии

Батура М. П., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Борисенко В. Е., д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Гасанов М. Г., д. т. н., профессор, Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Козлов С. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Лабуню В. А., акад. НАН Беларуси, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Писецкий Ю. В., д. т. н., доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, Ташкент, Узбекистан

Сигов А. С., акад. РАН, д. ф.-м. н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Смирнов А. Г., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Татур М. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь, рег. номер 1087

Журнал издается с 2003 г. Дата последней перерегистрации 23 января 2010 г.

Подписано в печать 15.08.2025. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 12,3. Тираж 75 экз. Заказ 158.

Адрес редакции:
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ком. 329а
Тел.: +375 17 293-88-41
doklady@bsuir.by; <http://doklady.bsuir.by>

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

DOKLADY BGUIR

V. 23, No 4, 2025

The scientific journal is published 6 times a year

Founder

Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

The Journal is included in the List of Scientific Editions in the Republic of Belarus,
as well as the following databases:

CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, CyberLeninka, RSCI

CONTENTS

Labunov V. A., Gusinsky A. V., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Tanana O. V. Oxidation Resistance of Carbon Fiber Felt “Carbofon-B-22”	5
Khatskevich A. D., Lanin V. L. Modeling of Thermal Fields in Induction Heating with Eddy Current Concentrators	14
Kurochkin A. E. Method of Improving the Shape of Amplitude-Frequency Characteristics of Resonant Radio Frequency Amplifiers with Double Autotransformer Inclusion	21
Zhamoit A. E., Solovjov Ja. A., Vidritskiy A. E. Calculation of the Integral Absorption Coefficient of the Sensitive Element of an Uncooled Thermal Detector of the Bolometric Type	29
Mordachev V. I. Radio Frequency Electromagnetic Background in 5G Hot Spots	35
Alboun R. F., Albishti A., Ayad H. Designing, Simulating and Analyzing of Microstrip Antenna for Wireless Body Network Using Two Different Types of Substrates	46
Artemyev V. M., Khmarskiy P. A., Naumov A. O. Reducing Radar Measurement Errors Using Ionosphere and Magnetosphere Monitoring Data	54
Aliakhnovich V. A., Ilyushchanka A. Ph., Ancheuski P. S. Loop Thermosiphon for Efficient Cooling of Miniature Heat Sources in Electronics	63
Matveyenka V. V., Matveyenka I. P. Calculating Electric and Magnetic Wave Types in a Cavity with Azimuthal-Longitudinally Irregular Section	70
Wang X., Saymanov I. M., Kabulov A. V., Prudnik A. M. Architecture of a Prototype System for Network Traffic Anomaly Detection Based on Machine Learning and Visual Analytics	77
Barysiuk A. A., Bandarenka H. V. Simulation of Electrodynamics and Photothermal Properties of Colloidal Silver Nanoparticles Stabilized with Organic Shell	85
Grigorieva G. G., Davydova N. S., Vassiouk V. E., Shukurov K. E. Analysis of Kinematic Parameters of Running in Children Based on Motion Capture	92
Piskun E. S., Maksimchuk U. A. Generative Design to Web Resources Taking Into Account the Influence of Color Solutions on the Perception of Content	101
Yi Tang, Pertsau D. Yu. Dynamic Relational Graph Modeling for Multi-Agent Motion Trajectory Prediction	109

Editor-in-Chief

Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Leonid M. Lynkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Viktor R. Stempitsky, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Olga V. Boiprav, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Responsible Secretary of the Editorial Board

Mikhail P. Batura, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Victor E. Borisenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mehman H. Hasanov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Sergei V. Kozlov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov, Acad. of the NAS of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Yuri V. Pisetsky, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Alexander S. Sigov, Acad. of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Alexander G. Smirnov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mikhail M. Tatur, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Viktor Yu. Tsvetkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Responsible Secretary T. Mironenka

The journal is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus, Reg. No 1087.

The journal has been published since 2003. Last re-registration date January 23, 2010.

Signed for printing 15.08.2025. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.

Ed.-pr. I. 14,18. Ed.-ed. I. 12,3. Edition 75 copies. Order 158.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

6, P. Brovki St., Off. 329a, 220013, Minsk

Tel.: +375 17 293-88-41

doklady@bsuir.by; <http://doklady.bsuir.by>

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.

6, P. Brovki St., Room 329a, 220013, Minsk

Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13>

УДК 677.024.5

УСТОЙЧИВОСТЬ УГЛЕВОЛОКНИСТОГО ВОЙЛОКА «КАРБОПОН-В-22» К ОКИСЛЕНИЮ

В. А. ЛАБУНОВ¹, А. В. ГУСИНСКИЙ¹, Н. А. ПЕВНЕВА¹, В. Н. РОДИОНОВА¹,
М. М. КАСПЕРОВИЧ¹, И. А. КАШКО¹, О. В. ТАНАНА²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(Новополоцк, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследования устойчивости углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22», активно используемого в качестве высокоэффективных широкополосных экранов электромагнитных излучений и радиопоглощающих материалов, к окислению при воздействии молекулярного кислорода в течение семи лет хранения при комнатной температуре. Исследованы образцы войлока, отожженные при температурах от 600 до 720 °С, для получения поверхностного сопротивления материала «Карбопон-В-22» от 1100 до 100 Ом. Отмечено увеличение в 1,7–1,8 раза поверхностного сопротивления по сравнению с первоначальным значением. Полученные данные о долговременной стабильности и надежности свойств материала «Карбопон-В-22» могут способствовать новым исследованиям и разработкам при его применении в различных областях.

Ключевые слова: углеродные волокна, поверхностное сопротивление углеродных волокон, радиопоглощающие материалы, сверхвысокие частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Устойчивость углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» к окислению / В. А. Лабунов [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13>.

OXIDATION RESISTANCE OF CARBON FIBER FELT “CARBOPON-B-22”

VLADIMIR A. LABUNOV¹, ALEXANDER V. GUSINSKY¹, NATALIA A. PEVNEVA¹,
VALENTINA N. RODIONOVA¹, MARINA M. KASPEROVICH¹,
IVAN A. KASHKO¹, OLGA V. TANANA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of the resistance of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”, actively used as highly effective broadband electromagnetic radiation screens and radio-absorbing materials, to oxidation under the influence of molecular oxygen during seven years of storage at room temperature. Felt samples annealed at temperatures from 600 to 720 °C were studied to obtain the surface resistance of the material “Carbopon-B-22” from 1100 to 100 Ohm. An increase of 1.7–1.8 times in surface resistance compared to the initial value was noted. The obtained data on the long-term stability and reliability of the properties of the material “Carbopon-B-22” can contribute to new research and development in its application in various fields.

Keywords: carbon fibers, surface resistance of carbon fibers, radio-absorbing materials, ultra-high frequencies.

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

For citation. Labunov V. A., Gusinsky A. V., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Tanana O. V. (2025) Oxidation Resistance of Carbon Fiber Felt “Carbopon-B-22”. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-5-13> (in Russian).

Введение

Научно-технический прогресс, обусловленный эффективным использованием достижений электроники, радиотехники, вычислительной техники, во многом оказался возможным благодаря уровню и темпам исследований в области создания материалов для этих отраслей техники, в том числе высокоэффективных широкополосных экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) и радиопоглощающих покрытий [1]. Разработка новых материалов для решения проблемы электромагнитной совместимости становится весьма актуальной в связи с развитием и увеличением мощности устройств СВЧ-радиоэлектроники, поскольку возникающее при их работе электромагнитное излучение на частотах высших типов гармоник создает значительные помехи радиоэлектронной аппаратуре и спутниковой связи. Существенное уменьшение взаимных помех в передающих и приемных трактах устройств, работающих в СВЧ-диапазоне, возможно за счет применения радиопоглощающих материалов (РПМ) нового поколения, обеспечивающих расширение функциональных и тактико-технических возможностей электронных средств [2], предохраняющих от обнаружения различные объекты [3]. Для практического внедрения новых РПМ необходимо исследовать комплекс электрофизических параметров, таких как отражение и поглощение электромагнитных волн в материале, диэлектрическая постоянная, тангенс угла диэлектрических потерь, нелинейная восприимчивость второго и третьего порядков, долговременная стабильность характеристик материалов [4].

В настоящее время в конструкциях экранов ЭМИ [5, 6], в композитных экранирующих и радиопоглощающих материалах [7, 8] широко применяются углеродные волокна, обладающие высокими механической прочностью и электропроводностью. Важным фактором для выбора в качестве поглотителей ЭМИ углеродных волокон является то, что обнаружен эффект аномально большого поглощения ЭМИ очень тонкими проводящими волокнами. Такой эффект наблюдается, когда на волокно падает электромагнитная волна, электрический вектор которой параллелен оси волокна. Эффективный диаметр волокна в данном случае в несколько сотен раз превышает его геометрический диаметр. Это размерный эффект, природа которого связана, скорее всего, с возбуждением токов при определенных соотношениях между эффективным диаметром волокна и длиной волны ЭМИ [9, 10].

Несмотря на достоинства углеродных волокон, у них есть существенный недостаток – окисление за счет молекулярного кислорода в течение определенного времени, что приводит к увеличению их волнового сопротивления. Кинетика окисления углеродных волокон различных типов исследована лишь в малом числе работ [11, 12].

Углеродные волокна для электромагнитного экранирования

Наиболее перспективным материалом для создания экранов ЭМИ являются тонкие проводящие углеродные волокна, получаемые высокотемпературной обработкой органических волокон, при которой происходит переход к углеродному волокну. Одновременно изменяются физико-химические и механические свойства материала.

При промышленном производстве углеродных волокон чаще всего используют нити из полиакрилонитрильных (ПАН) волокон, пеков и гидратцеллюлозных (ГЦ) волокон. Для изготовления композиционных материалов конструкционного назначения применяются углеродные нити из ПАН волокон, характеризующиеся высокой прочностью и жесткостью (модулем упругости) [13]. Углеродные волокна из ГЦ, которые обладают более низкими значениями прочности и модуля упругости, используют как теплозащитные, фильтрующие, сорбирующие, электрорезистивные и РПМ. Главные характеристики углеродных нитей из ГЦ – высокая удельная поверхность, пористая структура, сорбционная способность, электрическая проводимость и диэлектрические свойства. Они могут перерабатываться в объемные текстильные структуры – ткани и вязаные полотна, в которых нити образуют объемные переплетения, так как в отличие от углеродных нитей из ПАН и пеков нити из ГЦ не являются хрупкими.

Впервые получение и применение углеродных волокон (в качестве нитей накаливания в электрических лампах) было предложено и запатентовано известным американским изобретателем Т. Эдисоном в 1880 г. Создание углеродного волокна из искусственных волокон способствовало его активному практическому применению. Для получения углеродных волокон

исследовались почти все типы химических и природных волокон: в качестве исходного сырья использовались волокна на основе алифатических и ароматических полиамидов, ароматических полиэфиров, гетероциклических термостойких полимеров, полиэтилена и др. В настоящее время используют: целлюлозное волокно – неплавкое и не требующее окисления; полиакрилонитрильное, из которого вырабатывается основная масса углеродного волокна с большим ассортиментом свойств; пековые волокна, из которых вырабатываются самые дешевые и самые дорогие волокна. Возможно применение и других исходных волокон, например, поливинилхлоридных, полиоксазольных, но они не имеют промышленного значения из-за сложной технологии изготовления, низкого качества и высокой стоимости получаемых углеродных волокон. Сегодня углеродные волокна производят в основном из вискозных и ПАН волокон.

Углеродные волокна (УВ) (к которым относится и углеволокнистый войлок «Карбон-В-22») получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются преимущественно атомы углерода. При температуре обработки ниже 1000 °С такие волокна содержат 85–90 % углерода (карбонизированные УВ), при 1000–1500 °С – 95–99 % (угольные УВ), при 1500–3000 °С – более 99 % (графитизированные УВ). Углеродные волокна первоначально получали по технологии, применяемой при синтезе стеклоуглерода. В настоящее время наиболее распространенный способ – пиролиз и последующая высокотемпературная обработка полимерных волокон. Волокнистую форму изделию придают на стадии предварительной обработки, а при пиролизе эта форма уже не изменяется. Огнестойкость волокна приобретают за счет окисления в воздушной среде, частичного дегидрирования, межмолекулярного сшивания и других процессов. При этом повышается стойкость волокон к плавлению при прогревании и сдерживается чрезмерное удаление атомов углерода. В процессе карбонизации по мере роста температуры происходят газификация и удаление всех атомов органического полимера, за исключением атомов углерода. Образовавшиеся УВ состоят из фрагментов полициклических ароматических молекул, имеющих плоскую шестиугольную сотовую структуру. При графитизации накапливаются ароматические фрагменты, повышаются модуль упругости и электропроводность волокон [13].

Углеволокнистый войлок производства ОАО «СветлогорскХимволокно»

Основными продуктами на основе углеродного волокна являются углеродный жгут, углеродные ленты и углеродная ткань. Углеродная ткань имеет высокую ориентацию волокон, что делает ее при взаимодействии с ЭМИ анизотропной и высокоотражающей. Наиболее перспективным продуктом для использования при создании широкополосного абсорбирующего экрана с минимальным отражением является углеволокнистый войлок, выпускаемый ОАО «СветлогорскХимволокно» (рис. 1).



Рис. 1. Углеволокнистый войлок производства ОАО «СветлогорскХимволокно»
Fig. 1. Carbon felt produced by JSC “SvetlogorskKhimvolokno”

Углеволокнистый (карбонизированный и графитизированный) войлок изготавливают из рубленых УВ путем насыпа заранее подготовленных волокон ровным слоем на перфорированный стол и с последующим сшиванием методом иглопробивания. Учитывая тот факт, что полотно войлока является нетканым, не следует ожидать от него стабильной толщины по длине всего полотна – в основном толщина колеблется в пределах ± 1 мм от номинально задекларированной.

Длина волокон, применяемых при производстве теплоизоляционных войлоков, может варьироваться от 0,5 до 50,0 мм в зависимости от типа и назначения войлока, а также от имеющихся в наличии типов волокна. Войлоки, изготовленные из коротких волокон, имеют худшие механические характеристики по сравнению с войлоками, изготовленными из длинных волокон. Однако они являются лучшими теплоизоляторами благодаря тому, что в них нет волокон, насквозь проходящих через толщину полотна и являющихся хорошими теплопроводниками.

В отечественной промышленности наиболее распространены две основные марки графитизированного войлока: НТМ-200 (Россия) и «Карбопон» (Беларусь). Среди углеволокнистых войлоков импортного производства наиболее известен GFA-10 (SGL Carbon, Германия). Элементный состав может вносить свой вклад в физико-химические свойства УВ, определяющие характер его взаимодействия с СВЧ-излучением.

При проведении исследований методом EDX изучали элементный состав углеволокнистого войлока производства ОАО «СветлогорскХимволокно» (рис. 2).

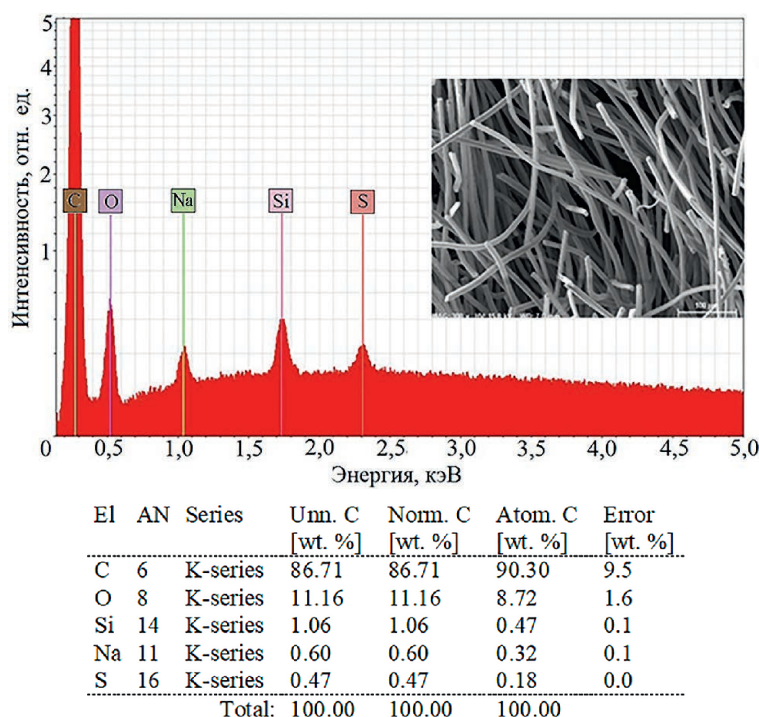


Рис. 2. Элементный состав углеволокнистого войлока производства ОАО «СветлогорскХимволокно»
Fig. 2. Elemental composition of carbon felt produced by JSC “SvetlogorskKhimvolokno”

Основные элементы состава – углерод С (86 %) и кислород О (11 %). Наличие Si, Na и S в составе связано с загрязнением оснастки растрового электронно-лучевого микроскопа, на котором проводились измерения EDX. Большое количество кислорода может быть связано с окисленной поверхностью углеродного волокна, либо с остаточным кислородом, оставшимся после карбонизации целлюлозы. В рассматриваемом случае использовалось карбонизированное волокно, т. е. отожженное при относительно низких температурах (до 1000 °С). В отличие от графитизированного волокна, отжигаемого при температурах до 3000 °С, карбонизированное волокно обладает волновым сопротивлением, близким к атмосферному волновому сопротивлению, что необходимо для снижения отражения ЭМИ в СВЧ-диапазоне. Однако при этом могут присутствовать остатки некарбонизированной целлюлозы. Водород невозможно зарегистрировать методом EDX. Таким образом, в структуре волокна, наряду с кислородом, возможно присутствие и водорода в составе остатков не прошедших карбонизацию молекул целлюлозы. Элементный состав может вносить свой вклад в физико-химические свойства УВ, определяющие характер его взаимодействия с СВЧ-излучением. Оптимизация внутренней структуры УВ посредством изменения режимов термообработки исходного вискозного волокна открывает возможность получения желаемых характеристических параметров взаимодействия рабочего поглощающего материала с ЭМИ СВЧ-диапазона.

Микрофотографии внутренней структуры углеволокнистого войлока, полученные методом растровой электронной микроскопии, показаны на рис. 3.

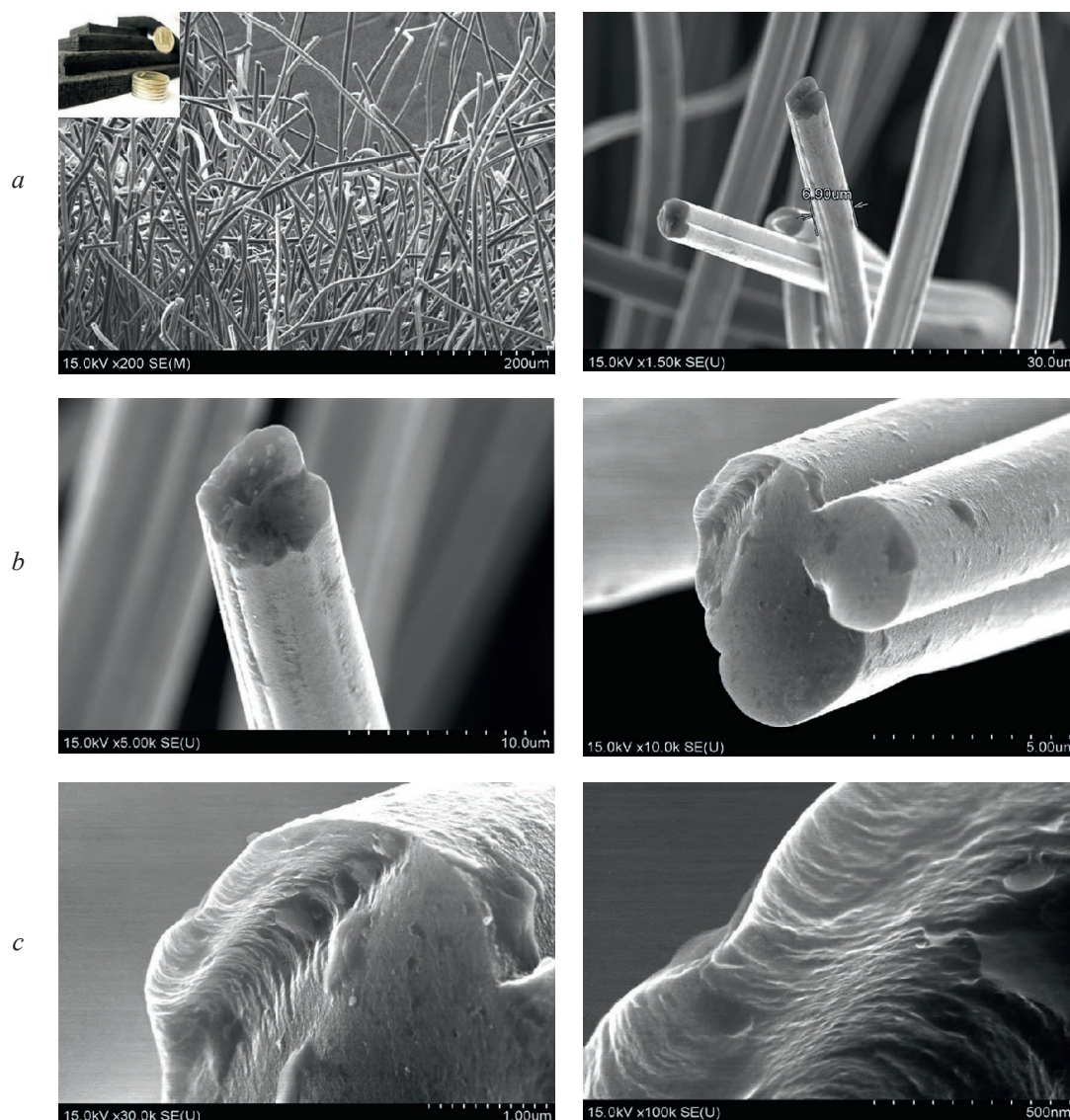


Рис. 3. Структура углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»
Fig. 3. Structure of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”

Как видно из микрофотографий, средний диаметр УВ лежит в диапазоне 5–7 мкм, средняя дистанция между волокнами (разреженность) – 10–20 мкм. Внутренняя структура волокна при микронном разрешении – плотная, сплошная, без видимых дефектов, включений и полостей. На рис. 3, с наблюдается некоторая зернистость внутренней структуры, однако на рис. 3, а, b она отсутствует. На микрофотографиях виден составной характер структуры УВ, которое спечено из двух, трех волокон меньшего диаметра. Как известно, структура волокна формируется при экструзии размягченной массы через систему мелких фильер. Скорее всего, составная структура УВ была задана соответствующей формой фильеры при экструзии гидратцеллюлозы.

Разнесенные в объеме волокна, отожженные при определенной температуре для получения требуемой проводимости, позволяют получить материал с разным значением волнового сопротивления, в том числе и материал, волновое сопротивление которого согласуется с волновым сопротивлением среды распространения электромагнитных волн. Проводимость углеволокнистого войлока зависит от температуры повторного отжига: чем она выше, тем больше процентное отношение углерода в волокнах, отсюда – выше проводимость материала.

В процессе исследований разработан температурно-временной технологический профиль высокотемпературного отжига в инертной азотной среде серийно выпускаемого углеродного нетканого материала «Карбопон В-22-М» с поверхностным сопротивлением 0,5 Ом [3]. В табл. 1 приведены температура отжига четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» и их поверхностное сопротивление.

Таблица 1. Параметры образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»
Table 1. Parameters of samples of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”

Номер образца	Температура отжига, °C	Поверхностное сопротивление, Ом
1	720	100–150
2	710	150–200
3	700	500–580
4	600	1100–1200

Методика проведения эксперимента и его результаты

В процессе выполнения экспериментов был разработан стенд (рис. 4) для измерения поверхностного сопротивления четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» при различных режимах отжига. Образец войлока «Карбопон-В-22» закреплялся на накладные медные контакты, размещенные по его краям. Методика проведения измерений соответствовала требованиям ГОСТ Р 50499–93 (МЭК 93-80) «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения удельного объемного и поверхностного сопротивления» и ГОСТ 19616–74 «Ткани и трикотажные полотна. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления».

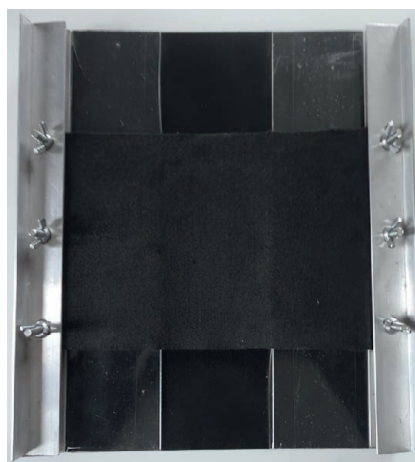


Рис. 4. Стенд для измерения поверхностного сопротивления углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» с закрепленным образцом

Fig. 4. Stand for measuring surface resistance of carbon fiber felt “Carbopon-B-22” with a fixed sample

На рис. 5 приведены результаты измерений поверхностного сопротивления четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» в течение семи лет хранения при комнатной температуре. Анализируя полученные данные, можно констатировать увеличение поверхностного сопротивления всех четырех образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22» примерно в 1,7–1,8 раза независимо от первоначального значения. Результаты исследований важны для прогнозирования долговременной стабильности характеристик такого войлока, который может использоваться в качестве высокоэффективных широкополосных экранов ЭМИ и радиопоглощающих покрытий. Для исключения окисления УВ от воздействия молекулярного кислорода необходима герметизация материала [14].

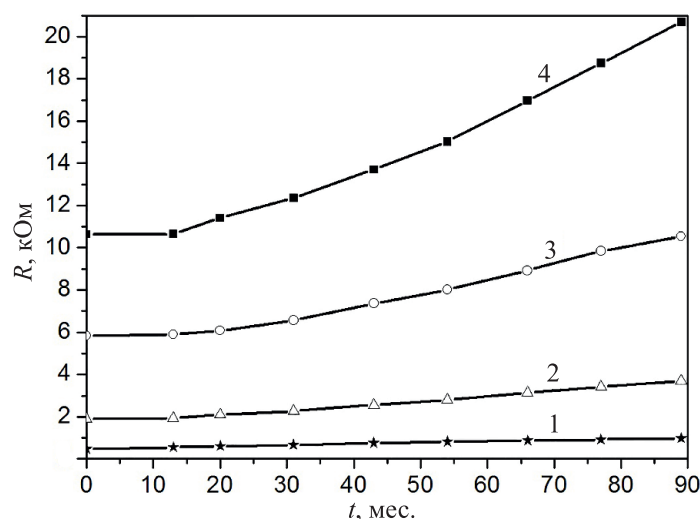


Рис. 5. Долговременное изменение поверхностного сопротивления образцов углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22»

Fig. 5. Long-term change in surface resistance of samples of carbon fiber felt “Carbopon-B-22”

Заключение

1. Окисление углеродных волокон приводит к ухудшению их свойств, в первую очередь физико-механических. В процессе окисления уменьшается средний размер кристаллитов за счет уменьшения размеров кристаллитов во внешнем слое волокна и увеличения расстояния между графитовыми плоскостями, что сопровождается повышением плотности волокна и потерей массы. Увеличение межплоскостных расстояний обусловлено реакцией кислорода с атомами углерода с образованием функциональных групп $-\text{COOH}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ и $\text{C}=\text{O}$. Проведенные исследования показали увеличение поверхностного сопротивления материала «Карбопон-В-22» в 1,7–1,8 раза в течение определенного времени независимо от первоначального значения.

2. Окисление может ограничивать использование углеродных волокон и материалов на их основе. Учитывая перспективность практического применения углеволокнистых материалов, новые данные о долговременной стабильности и надежности их свойств могут способствовать новым исследованиям и разработкам модификации конструктива использования данных материалов.

Список литературы

1. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богуш [и др.]. Минск: Бестпринт, 2003.
2. Bogush, V. A. Application of Electroless Metal Deposition for Advanced Composite Shielding Materials / V. A. Bogush // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2005. Vol. 7, No 3. P. 1635–1643.
3. Широкополосный поглотитель электромагнитного излучения / В. А. Богуш [и др.] // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 10. С. 15–20.
4. Характеристики отражения градиентной углеродной структуры с магнитными наночастицами в сверхвысокочастотном диапазоне / А. В. Гусинский [и др.] // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. XII Междунар. симп., Минск, 21–23 сент. 2022 г. Минск: Издат. центр БГУ, 2022. С. 74–86.
5. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном / А. С. Агафонова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 56–59.
6. Chung, D. D. L. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials / D. D. L. Chung // Carbon. 2001. Vol. 39, Iss. 2. P. 279–285.
7. Emerson and Cuming_Microwave Products [Electronic Resource]. Mode of access: http://eltm.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf. Date of access: 18.09.2024.
8. Interaction of Electromagnetic Waves in a Waveguide with Very Thin Wires / He Shi [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. 2011. Vol. 56. P. 1193–1196.

9. Values of the Absorption Efficiency Factor of a Thin Metal Cylinder in the Microwave Band / V. M. Kuzmichev [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. 2003. Vol. 48, No 11. P. 1240–1242.
10. Method Fabrication of Electroconductive Fibers: Pat. US 3022026 / C. G. Cofer, D. E. Mccooy. Publ. 13.03.2019.
11. Сидорина, А. И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) / А. И. Сидорина // Авиационные материалы и технологии. 2021. Т. 64, № 3. С. 105–116.
12. Park, S.-J. Carbon Fibers / S.-J. Park. Singapore: Springer Verlag, 2019.
13. Мелешко, А. И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты / А. И. Мелешко, С. П. Половников. М.: Сайнс-Пресс, 2007.
14. Широкополосный поглотитель электромагнитного излучения и способ его изготовления: пат. BY 23903 / В. А. Богущ, В. А. Лабунов, А. В. Гусинский, В. А. Карпович, В. Н. Родионова. Опубл. 30.12.2022.

Поступила 18.02.2025

Принята в печать 26.05.2025

References

1. Bogush V. A., Borbotko T. V., Gusinsky A. V., Lynkov L. M., Tamelo A. A. (2003) *Electromagnetic Radiation. Methods and Means of Protection*. Minsk, Bestprint (in Russian).
2. Bogush V. A. (2005) Application of Electroless Metal Deposition for Advanced Composite Shielding Materials. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 7 (3), 1635–1643.
3. Bogush V. A., Labunov V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Rodionova V. N., Pevneva N. A., et al. (2024) Broadband Absorber of Electromagnetic Radiation. *Radio Engineering and Electronics*. 69 (10), 15–20 (in Russian).
4. Gusinsky A. V., Pevneva N. A., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Rodionova V. N. (2022) Reflection Characteristics of a Gradient Carbon Structure with Magnetic Nanoparticles in the Microwave Range. *Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter: Collection of Scientific Papers from the XII International Symposium, Minsk, Sept. 21–23*. Minsk, BSU Publishing Center. 74–86 (in Russian).
5. Agafonova A. S., Belyaev A. A., Kondrashov E. K., Romanov A. M. (2013) Features of the Formation of Monolithic Structural Radio-Absorbing Materials Based on Composites Filled with Resistive Fiber. *Aviation Materials and Technologies*. (3), 56–59 (in Russian).
6. Chung D. D. L. (2001) Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials. *Carbon*. 39 (2), 279–285.
7. *Emerson and Cuming_Microwave Products*. Available: http://eltn.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf (Accessed 18 September 2024).
8. Shi He, Shulga S. N., Kokodity N. G., Gorobets N. N., Kiiko V. I., Butrym A. Yu., et al. (2011) Interaction of Electromagnetic Waves in a Waveguide with Very Thin Wires. *J. Commun. Technol. Electron*. 56, 1193–1196.
9. Kuzmichev V. M., Kokodii N. G., Safronov B. V., Balkashin V. P. (2003) Values of the Absorption Efficiency Factor of a Thin Metal Cylinder in the Microwave Band. *J. Commun. Technol. Electron*. 48 (11), 1240–1242.
10. Cofer C. G., Mccooy D. E. (2019) Method Fabrication of Electroconductive Fibers. *Pat. US 3022026*. Publ. 13.03.2019.
11. Sidorina A. I. (2021) Multiaxial Carbon Fabrics in Aviation Products (Review). *Aviation Materials and Technologies*. 3 (64), 105–116 (in Russian).
12. Park S.-J. (2019) *Carbon Fibers*. Singapore, Springer Verlag.
13. Meleshko A. I., Polovnikov S. P. (2007) *Carbon, Carbon Fibers, Carbon Composites*. Moscow, Science-Press Publ. (in Russian).
14. Bogush V. A., Labunov V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Rodionova V. N. (2022) Broadband Absorber of Electromagnetic Radiation and the Method of Its Manufacture. *Pat. BY 23903*. Publ. 30.12.2022 (in Russian).

Received: 18 February 2025

Accepted: 26 May 2025

Вклад авторов

Лабунов В. А. осуществил постановку задачи, отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания, проанализировал и интерпретировал данные.

Гусинский А. В. осуществил выработку технических требований к комплексу свойств для материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением, проанализировал и интерпретировал данные.

Певнева Н. А. представила замысел и дизайн исследования электродинамических параметров углеволокнистого войлока «Карбопон-В-22», провела исследования, подготовила статью к публикации, обработала данные, оформила статью для публикации.

Остальные авторы внесли равнозначный вклад в подготовку статьи.

Authors' contribution

Labunov V. A. formulated the problem, edited and finally approved the manuscript for publication, critically revised it for significant intellectual content, analyzed and interpreted the data.

Gusinsky A. V. developed technical requirements for a set of properties for materials interacting with electromagnetic radiation, analyzed and interpreted the data.

Pevneva N. A. presented the concept and design of the study of electrodynamic parameters of conductive polymers, conducted the research, prepared the article for publication, processed the data, formatted the article for publication.

The remaining authors made an equal contribution to the preparation of the article.

Сведения об авторах

Лабунов В. А., д-р техн. наук, проф., зав. науч.-исслед. лаб. интегрированных микро- и наносистем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гусинский А. В., д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр. Научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9), БГУИР

Певнева Н. А., канд. техн. наук, доц., зав. поверочной лаб. Центра 1.9, БГУИР

Родионова В. Н., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Касперович М. М., науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Кашко И. А., науч. сотр. науч.-исслед. лаб. интегрированных микро- и наносистем, БГУИР

Танана О. В., канд. техн. наук, зам. декана гуманитарного факультета, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Певнева Наталья Алексеевна

Information about the authors

Labunov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Research Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gusinsky A. V., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chief Researcher of the Scientific, Production, Educational Innovation Center of Microwave Technologies and Their Metrological Support (Center 1.9), BSUIR

Pevneva N. A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Verification Laboratory of the Center 1.9, BSUIR

Rodionova V. N., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher of Center 1.9, BSUIR

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9, BSUIR

Kashko I. A., Researcher at the R&D Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems, BSUIR

Tanana O. V., Cand. Sci. (Tech.), Deputy Dean of the Faculty of Humanities, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Pevneva Natalia Alekseevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20>

УДК 621.365.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

А. Д. ХАЦКЕВИЧ, В. Л. ЛАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Получена трехмерная нелинейная математическая модель индукционного нагрева для формирования шариковых выводов по технологии Flip-Chip. Исследование проведено на частотах 300, 732 и 900 кГц при мощности нагрева 20–100 Вт. Применение ферритового сердечника, фокусирующего магнитное поле, и концентратора вихревых токов позволило установить оптимальные термопрофили формирования шариковых выводов для монтажа интегральных схем со скоростью нагрева от 2,0 до 5,5 °С/с. При анализе полученных результатов по итогам экспериментов оптимальным оказался вариант расположения концентратора снизу платы. В этом случае нагрев шариков припоя на выбранных частотах достиг температуры плавления шариковых выводов 230–250 °С, что достаточно для их оплавления.

Ключевые слова: моделирование, индукционный нагрев, Flip-Chip.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хацкевич, А. Д. Моделирование тепловых полей индукционного нагрева с концентраторами вихревых токов / А. Д. Хацкевич, В. Л. Ланин // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20>.

MODELING OF THERMAL FIELDS IN INDUCTION HEATING WITH EDDY CURRENT CONCENTRATORS

ALEKSANDR D. KHATSKEVICH, VLADIMIR L. LANIN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A three-dimensional nonlinear mathematical model of induction heating for forming ball terminals using the Flip-Chip technology has been developed. The study was conducted at frequencies of 300, 732, and 900 kHz with a heating power of 20–100 W. The use of a ferrite core focusing the magnetic field and an eddy current concentrator allowed us to establish optimal thermal profiles for forming ball terminals for mounting integrated circuits with a heating rate of 2.0 to 5.5 °C/s. When analyzing the results obtained from the experiments, the option of locating the concentrator at the bottom of the board turned out to be optimal. In this case, heating the solder balls at the selected frequencies reached the melting temperature of the ball terminals of 230–250 °C, which is sufficient for their reflow.

Keywords: modeling, induction heating, Flip-Chip.

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

For citation. Khatskevich A. D., Lanin V. L. (2025) Modeling of Thermal Fields in Induction Heating with Eddy Current Concentrators. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20> (in Russian).

Введение

Технология Flip-Chip представляет собой инновационное решение, позволяющее достичь высокой плотности компоновки электронных компонентов и улучшенных электрических характеристик, что делает ее предпочтительной для создания сложных многоуровневых микроэлектронных модулей. С помощью технологии Flip-Chip обеспечивается прямое соединение контактных площадок чипа и подложки, что исключает необходимость использования проволочных соединений и, как следствие, уменьшает их индуктивность и сопротивление, а также повышает надежность устройства.

Одним из основных преимуществ технологии Flip-Chip является возможность уменьшения габаритов электронных устройств. Благодаря компактности и высокой плотности монтажа Flip-Chip широко используется в мобильных устройствах, высокопроизводительных вычислительных системах, телекоммуникационном оборудовании и автомобильной электронике. В современных смартфонах применение этой технологии позволяет уменьшить энергопотребление, увеличить производительность и улучшить теплоотвод.

Индукционный нагрев как метод формирования шариковых выводов по технологии Flip-Chip имеет ряд уникальных преимуществ. Он обеспечивает высокую скорость нагрева, что минимизирует время воздействия высоких температур на чувствительные компоненты. Это особенно важно для материалов, подверженных термическому повреждению, таких как полимерные подложки или композитные материалы. Более того, индукционный нагрев обеспечивает равномерное распределение температуры в зоне пайки, что критически важно для обеспечения качества и надежности соединений [1].

Использование индукционного нагрева позволяет минимизировать термические напряжения и деформации, возникающие в результате различий коэффициентов теплового расширения между соединяемыми материалами. Это достигается благодаря локализованному воздействию нагрева и возможности точного контроля температурного профиля. Такие характеристики делают метод индукционного нагрева перспективным для применения в условиях, где требуются высокая точность и надежность монтажа.

Современные исследования в области пайки Flip-Chip направлены на улучшение технологий термообработки, разработку новых материалов припоев, а также оптимизацию конструкций контактных соединений. Особое внимание уделяется моделированию и экспериментальным исследованиям, позволяющим глубже понять процессы, происходящие в зоне пайки, и найти пути повышения производительности и качества соединений. Развитие технологии Flip-Chip является ключевым фактором в прогрессе микроэлектронной промышленности и способствует созданию новых поколений устройств с повышенными характеристиками и функциональностью [2]. Исследование методов и технологий пайки Flip-Chip поможет не только понять их роль в современной электронике, но и определить перспективы их дальнейшего использования в условиях постоянно растущих требований к компактности, надежности и производительности [3].

Цель исследований – моделирование тепловых полей при формировании шариковых выводов по технологии Flip-Chip с использованием индукционного нагрева.

Геометрическая модель

Рассматриваемая геометрическая модель представлена в виде индуктора, сверху которого находится печатная плата FR4 толщиной 2,5 мм, а на ее поверхности расположены шарики бессвинцового припоя Sn–3,5Ag–0,5Cu. Над ними помещен медный концентратор с вырезами под шарики толщиной 0,5 мм, шириной и длиной 20 мм (рис. 1). Всю конструкцию охватывает ферритовый магнитопровод в виде кольца с относительной магнитной проницаемостью 2000.

В процессе индукционного нагрева наблюдается скин-эффект, при котором переменный электрический ток высокой частоты концентрируется в поверхностных слоях проводника, уменьшая плотность тока в его глубине. Глубина проникновения характеризует расстояние от поверхности проводника, на котором плотность тока уменьшается в e (константа Эйлера) раз и рассчитывается по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}, \quad (1)$$

где δ – глубина проникновения; μ – магнитная проницаемость, $\mu = \mu_r \mu_0$; μ_r – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная; σ – электропроводность материала, С/м; ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$; f – частота, Гц.

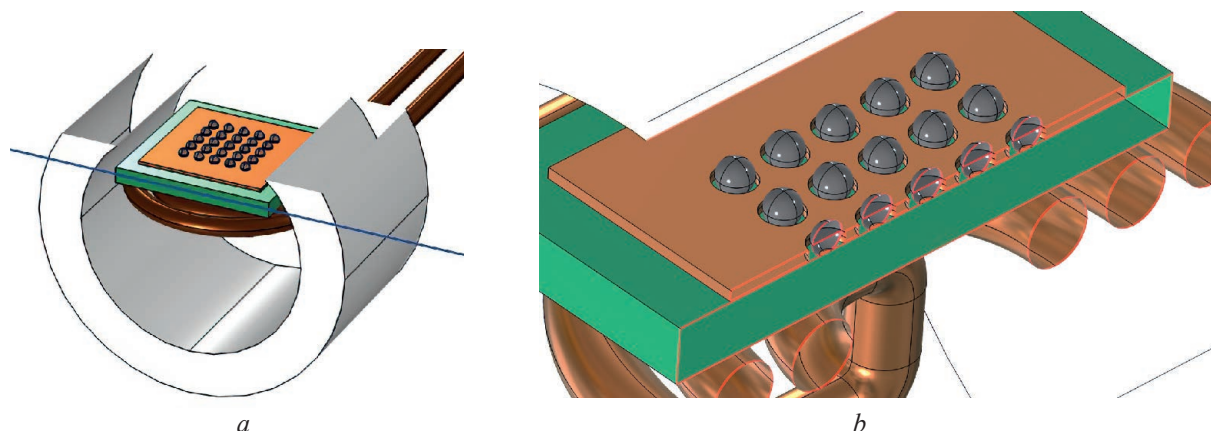


Рис. 1. Геометрическая модель локального индукционного нагрева: *a* – вид сверху; *b* – разрез
Fig. 1. Geometric model of local induction heating: *a* – top view; *b* – section

Глубина проникновения токов высокой частоты при скин-эффекте не должна превышать диаметр шарика припоя, так как это приведет к образованию дефектов при пайке. Для определения диапазона частот индукционного нагрева воспользуемся формулой (1). Типоразмеры шариков припоя выбирались в соответствии со стандартом IPC-7351, который предоставляет общие требования по конструированию контактных площадок и печатных плат с применением технологии поверхностного монтажа для различных компонентов, включая тип корпуса поверхностно монтируемых интегральных микросхем BGA (англ. ball grid array – массив шариков). Данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Выбор частотного диапазона индукционного нагрева
Table 1. Selecting the frequency range of induction heating

Диаметр шарика припоя, мм	Диапазон частот
0,760	127 кГц–1 МГц
0,300	806 кГц–1 МГц
0,200	1810 кГц–2 МГц

Моделирование проводилось на частотах 300, 732 и 900 кГц при напряжении на индукторе от 60 до 120 В. Выбор частот обусловлен возможностями ZVS-генератора. Основным критерием являлась температура нагрева шариков припоя, которая должна была быть выше температуры плавления на 20 °С, а для выбранного бессвинцового припоя (Sn–3,5Ag–0,5Cu) она составляла 220 °С.

Математическое моделирование индукционного нагрева

Моделирование индукционного нагрева включало решение уравнений электромагнетизма и теплопередачи [4]. Процесс нагрева описывается уравнением теплопередачи

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость; ∇T – градиент температуры; k – коэффициент теплопроводности; Q – количество тепла, выделяемого материалом.

Количество тепла Q , выделяемого материалом, связано с плотностью тока J и определяется по формуле

$$Q = JE, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля.

Условие Дирехле в электромагнитной задаче оказывает влияние на распределение токов и, следовательно, на тепловыделение, а также может задавать граничные условия электромагнитного поля, что влияет на температуру в моделируемом объекте:

– граничные условия:

$$A|_{\Gamma} = g(\Gamma); \quad (4)$$

– условие Дирихле:

$$\frac{\partial A}{\partial n}|_{\Gamma} + f(\Gamma)A|_{\Gamma} = h(\Gamma), \quad (5)$$

где A – искомая функция; $\frac{\partial A}{\partial n}|_{\Gamma}$ – нормальная производная функции A на границе Γ (условие Неймана); $A|_{\Gamma}$ – значение функции A на границе Γ (условие Дирихле); $h(\Gamma)$ – функция, задающая граничное условие внешнего теплового потока.

Для корректного решения задачи индукционного нагрева в модели необходимо связать решения электромагнитных и тепловых уравнений. Алгоритм моделирования представлен на рис. 2.

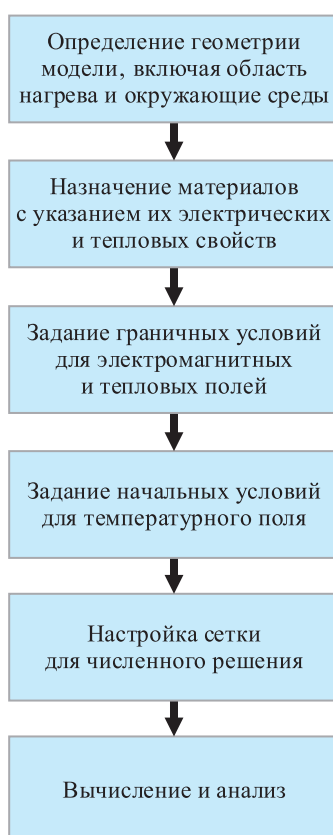


Рис. 2. Алгоритм моделирования электромагнитных и тепловых полей локального индукционного нагрева

Fig. 2. Algorithm for modeling electromagnetic and thermal fields of local induction heating

Проведение эксперимента

Моделирование тепловых полей проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics. На первом этапе была получена модель тепловых полей (рис. 3) в шариках припоя без применения концентратора вихревых токов. Анализ модели показал, что в данной конфигурации шарики припоя греются неравномерно, разница между самой горячей и холодной точками составляет около 100 °С, что не допустимо при формировании шариковых выводов. А в случае использования конфигурации с медным концентратором и ферритовым сердечником происходит равномерное распределение температуры в зоне формирования шариковых выводов.

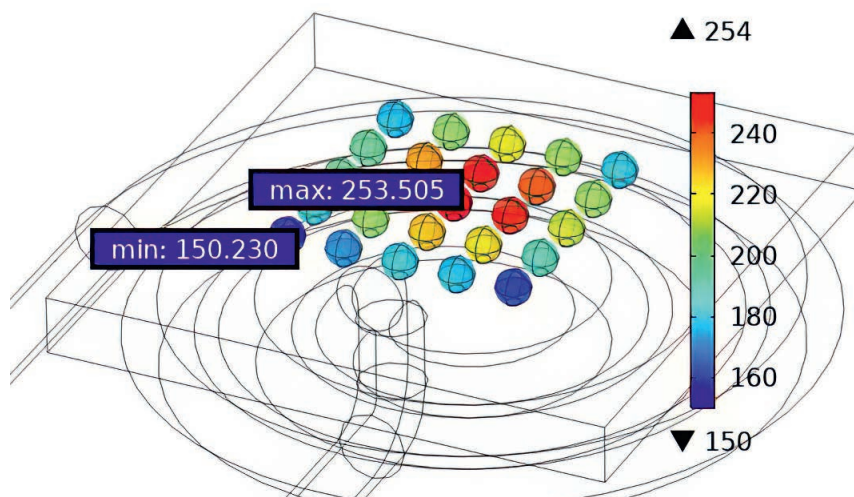


Рис. 3. Температурные поля без использования концентратора на частоте 732 кГц
Fig. 3. Temperature fields without using a concentrator at a frequency of 732 kHz

Следует отметить, что при варианте, когда концентратор располагался сверху, происходил его перегрев, а температура шариков припоя оставалась недостаточной для их оплавления. Температура шариков на частоте 300 кГц достигала 100 °С, при этом температура концентратора превышала 370 °С на 40-й секунде нагрева. На частотах 732 и 900 кГц температура шариков достигала примерно 80–100 °С при нагреве концентратора на 40-й секунде до 200–250 °С. При креплении концентратора на плату снизу отмечался значительный его нагрев до 300 °С. Однако при этом на частоте 300 кГц температура шариков припоя составляла около 230–250 °С, и происходило их оплавление. Тепловые поля с вариантом размещения концентратора на плате снизу представлены на рис. 4.

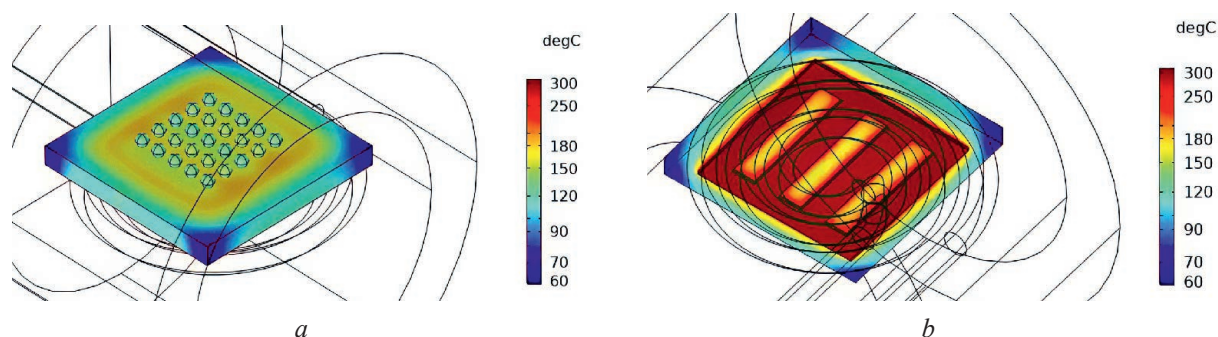


Рис. 4. Тепловые поля при креплении концентратора на плату снизу: *a* – вид сверху; *b* – вид снизу
Fig. 4. Thermal fields when mounting the concentrator on the board from below:
a – top view; *b* – view from below

При анализе температуры шариков припоя применялась интегральная оценка сразу для всех шариков на плате. На рис. 5 представлены зависимости температуры шариков припоя от времени нагрева на частотах 300, 732 и 900 кГц при напряжении на индукторе 60 В в случае расположения концентратора снизу платы, на рис. 6 – зависимости температуры концентратора от времени нагрева на тех же частотах.

При индукционном нагреве без ферритового кольца и концентратора шарики припоя не нагреваются до температуры плавления. Вариант крепления концентратора сверху на печатной плате с вырезами под шариками приводит к перегреву концентратора, при этом температура шариков припоя не превышает 100 °С при 300 кГц и 80–100 °С при 732 и 900 кГц соответственно. Оптимальный вариант – расположение концентратора снизу платы, поскольку в этом случае нагрев шариков припоя на частотах 300, 732 и 900 кГц достигает температуры плавления 230–250 °С, что достаточно для их оплавления.

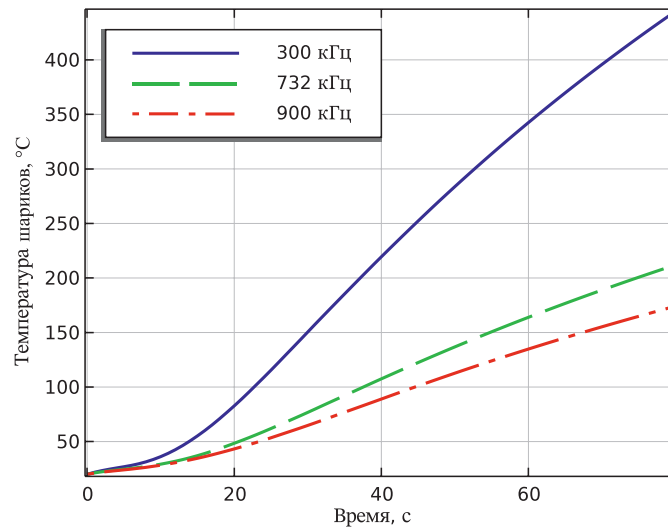


Рис. 5. Зависимость температуры шариков припоя от времени нагрева при расположении концентратора снизу платы

Fig. 5. Dependence of solder ball temperature on heating time when the concentrator is located at the bottom of the board

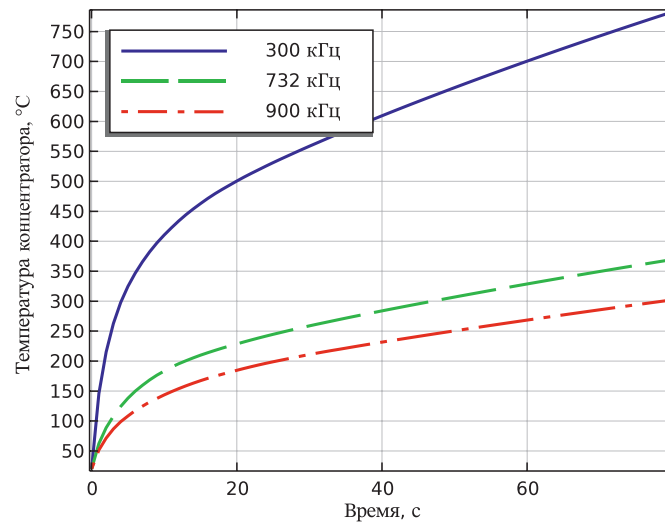


Рис. 6. Зависимость температуры концентратора, расположенного снизу платы, от времени нагрева

Fig. 6. Temperature dependence of the concentrator located at the bottom of the board on heating time

Заключение

Разработанная трехмерная нелинейная модель тепловых полей индукционного нагрева при технологии Flip-Chip позволила оптимизировать процесс оплавления шариков припоя при их закреплении на контактных площадках платы. Для повышения эффективности индукционного нагрева проводилась фокусировка магнитного поля индуктора, что увеличило скорость нагрева до 2,0–5,5 °C/с в диапазоне частот 300–900 кГц при мощности нагрева до 100 Вт. Расположение концентратора снизу под печатной платой позволяет осуществить равномерный ее нагрев.

Список литературы / References

1. Baker J., Smith R., Johnson P. (2021) Advances in Induction Heating for Electronics Assembly. *Journal of Microelectronics Manufacturing*. 34 (3), 123–134.
2. Kim Y., Lee H., Park S. (2020) Thermal Management in Flip Chip Bonding: Challenges and Solutions. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 43 (5), 789–798.

3. Xu L., Zhang W., Chen Q. (2019) Innovations in Flip Chip Soldering Technologies. *Microelectronics International*. 36 (4), 245–257.
4. Hongbo Xu, Mingyu Li, Yonggao Fu, Ling Wang, Jongmyung Kim (2009) Local Melt Process of Solder Bumping by Induction Heating Reflow. *Soldering and Surface Mount Technology*. 25 (4), 45–54.

Поступила 01.04.2025

Received: 1 April 2025

Принята в печать 11.05.2025

Accepted: 11 May 2025

Вклад авторов

Хацкевич А. Д. осуществил численное моделирование процесса индукционного нагрева, включая разработку математической модели, верификацию расчетных методов и анализ полученных результатов.

Ланин В. Л. в качестве научного руководителя сформулировал постановку задачи, предложил ключевые направления исследования, а также обеспечил научно-методологическое сопровождение работы на всех этапах ее выполнения.

Authors' contribution

Khatskevich A. D. carried out numerical modeling of the induction heating process, including the development of a mathematical model, verification of calculation methods and analysis of the obtained results.

Lanin V. L. as a scientific supervisor formulated the problem statement, proposed key areas of research, and also provided scientific and methodological support for the work at all stages of its implementation.

Сведения об авторах

Хацкевич А. Д., исследователь, магистр техн. наук, ассист. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ланин В. Л., д-р техн. наук, проф. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 652-50-30
E-mail: dvpodt94@mail.ru
Хацкевич Александр Дмитриевич

Information about the authors

Khatskevich A. D., Researcher, M. of Sci. (Tech.), Assistant at the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Lanin V. L., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 652-50-30
E-mail: dvpodt94@mail.ru
Khatskevich Aleksandr Dmitrievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28>

УДК 621.375.122

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ФОРМЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОЧАСТОТЫ С ДВОЙНЫМ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

А. Е. КУРОЧКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрены особенности формирования амплитудно-частотных характеристик резонансных усилительных каскадов с двойным автотрансформаторным включением. Выполнено моделирование амплитудно-частотной характеристики резонансного каскада в программе схемотехнического проектирования Multisim. Проведен анализ передаточной функции цепи и выявлены факторы, влияющие на формирование частотной характеристики каскада в широком диапазоне частот. Обращено внимание на нежелательное искажение формы амплитудно-частотной характеристики каскада вне рабочей полосы частот, приводящее к снижению затухания и ухудшению избирательности по побочным каналам приема. Даны рекомендации по улучшению формы амплитудно-частотных характеристик вне рабочей полосы частот за счет параллельного включения автотрансформаторов.

Ключевые слова: усилительные каскады, согласующие цепи, амплитудно-частотная характеристика, автотрансформаторы, компьютерное моделирование, сигнальные графы, формула Мэсона.

Для цитирования. Курочкин, А. Е. Способ улучшения формы амплитудно-частотных характеристик резонансных усилителей радиочастоты с двойным автотрансформаторным включением / А. Е. Курочкин // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28>.

METHOD OF IMPROVING THE SHAPE OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RESONANT RADIO FREQUENCY AMPLIFIERS WITH DOUBLE AUTOTRANSFORMER INCLUSION

ALEXANDER E. KUROCHKIN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Features of formation of amplitude-frequency characteristics of resonant amplifier stages with double autotransformer inclusion are considered. The amplitude-frequency characteristic of the resonant cascade was simulated using the Multisim circuit design program. The transfer function of the circuit is analyzed and the factors influencing the formation of the frequency response of the cascade in a wide frequency range are revealed. Attention is drawn to the undesirable distortion of the shape of the amplitude-frequency response of the cascade outside the operating frequency band, leading to a decrease in attenuation and deterioration of selectivity on the side channels of reception. Recommendations are given for improving the shape of the amplitude-frequency characteristics outside the operating frequency band by parallel connection of autotransformers.

Keywords: amplification stages, matching circuits, amplitude-frequency characteristic, autotransformers, computer modeling, signal graphs, Mason formula.

For citation. Kurochkin A. E. (2025) Method of Improving the Shape of Amplitude-Frequency Characteristics of Resonant Radio Frequency Amplifiers with Double Autotransformer Inclusion. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28> (in Russian).

Введение

В радиоприемных устройствах (РПУ) широко распространены согласующие цепи (СЦ) с двойной автотрансформаторной связью с источником сигнала и нагрузкой [1–3]. Такие цепи применяются в качестве входных и выходных СЦ благодаря возможности обеспечения максимальной передачи при заданной полосе пропускания. На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема резонансного усилителя радиочастоты с двойной автотрансформаторной связью, где: E_n , e_c – источник питания и сигнала соответственно; R_c , C_c – сопротивление и емкость источника сигнала; R_n , C_n – сопротивление и емкость нагрузки.

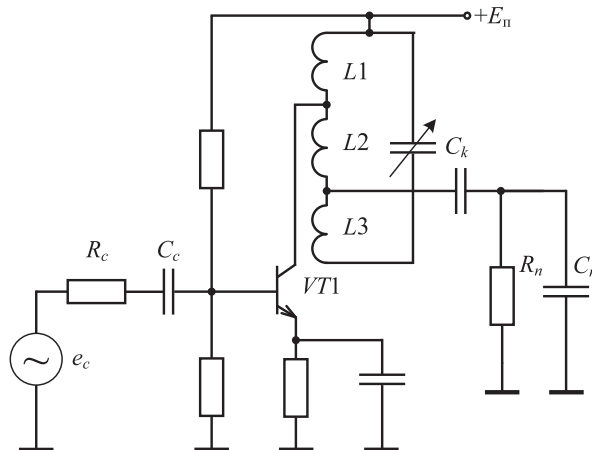


Рис. 1. Резонансный усилитель радиочастоты с двойной автотрансформаторной связью
Fig. 1. Dual autotransformer coupled resonant RF amplifier

В выходной СЦ применено двойное автотрансформаторное включение, т. е. автотрансформаторная связь основного контура с коллектором транзистора и с нагрузкой. Основной колебательный контур содержит катушки $L1$, $L2$, $L3$ и переменный конденсатор C_k . Недостатком всех СЦ с двойной автотрансформаторной связью является наличие нескольких дополнительных резонансных контуров [2, 3]. Первый контур с частотой резонанса f_{01} содержит катушку $L1$ и конденсатор $C_{\text{вых}}$, емкость которого определяется выходной емкостью транзистора $VT1$, емкостью монтажа и собственной емкостью катушки. Контур расположен непосредственно в цепи коллектора и может работать по аналогии с режимами работы входных цепей РПУ в двух режимах: укорочения длины волны ($f_0 < f_{01}$ – работа с повышением частоты) или удлинения длины волны ($f_0 > f_{01}$ – работа с понижением частоты). Второй нежелательный контур образуется емкостью нагрузки C_n совместно с индуктивностью катушек СЦ с частотой резонанса f_{02} . Этот контур расположен непосредственно в цепи нагрузки. В зависимости от соотношения резонансных частот f_0 , f_{01} , f_{02} основного и дополнительных контуров имеет место значительное ухудшение формы амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) на частотах ниже или выше рабочей частоты, что может привести к уменьшению затухания и степени подавления побочных каналов приема, таких как прямой и зеркальный каналы. В статье рассматривается способ модернизации выходной СЦ и улучшения формы АЧХ и, следовательно, избирательности по побочным каналам приема.

Проведение эксперимента

Проверка функционирования каскада (рис. 2) производилась путем моделирования в программе схемотехнического проектирования Multisim при емкости основного контура $C3 = 400$ пФ и емкости нагрузки $C5$ от 5 до 160 пФ. АЧХ каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C5 = \text{var}$ изображены на рис. 3. Как видно из результатов моделирования, наблюдается ухудшение формы АЧХ в области частот выше резонансной. Кроме основного резонанса, на частоте $f_0 \approx 330$ кГц (самый левый максимум) наблюдаются резонансы контура $L2C5$ на множестве частот f_{02} более 500 кГц. Также отмечается значительный подъем АЧХ в широкой области частот, обусловленный наличием контура $L1C_{\text{вых}}$ в режиме укорочения, о чем можно судить по росту напряжения на резонансных частотах f_{02} по мере приближения к f_{01} (сосредоточение множества максимумов в районе 10 МГц). Кроме того, наблюдается провал АЧХ на частоте $f_{03} \approx 500$ кГц, что обусловлено образованием элементами $L3$ и $C3$ последовательного резонансного контура.

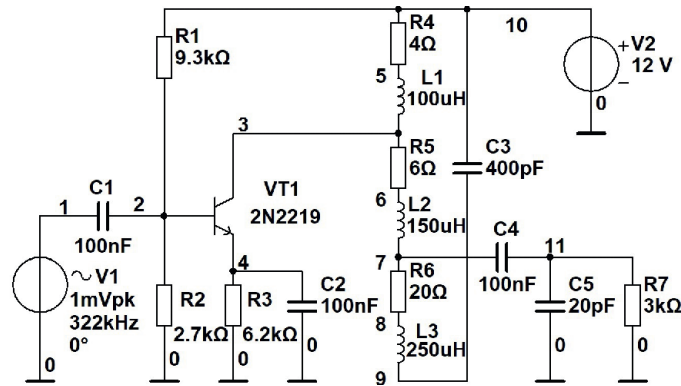


Рис. 2. Схема каскада с двойной автотрансформаторной связью в программе Multisim
Fig. 2. Schematic diagram of the cascade with double autotransformer coupling in Multisim program

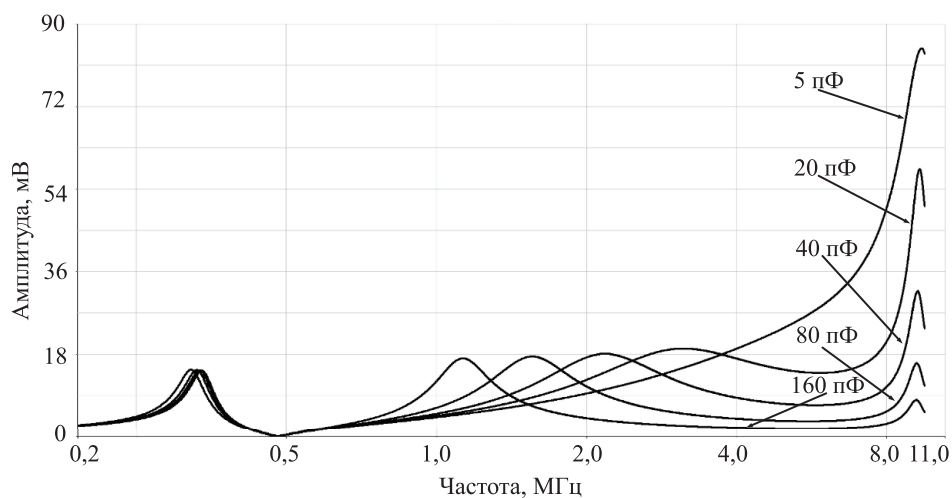


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C5 = \text{var}$
Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of a cascade with double autotransformer coupling at $C5 = \text{var}$

На рис. 4 представлены результаты моделирования при емкости нагрузки $C5 = 20$ пФ и значениях емкости основного контура $C3$ от 20 до 400 пФ. Хорошо видны три явления: ярко выраженный резонанс коллекторной цепи из-за режима укорочения в районе 10 МГц, рост резонансного коэффициента передачи основного контура по мере приближения к частоте резонанса укороченной коллекторной цепи и наличие нуля передачи из-за контура $L3C3$.

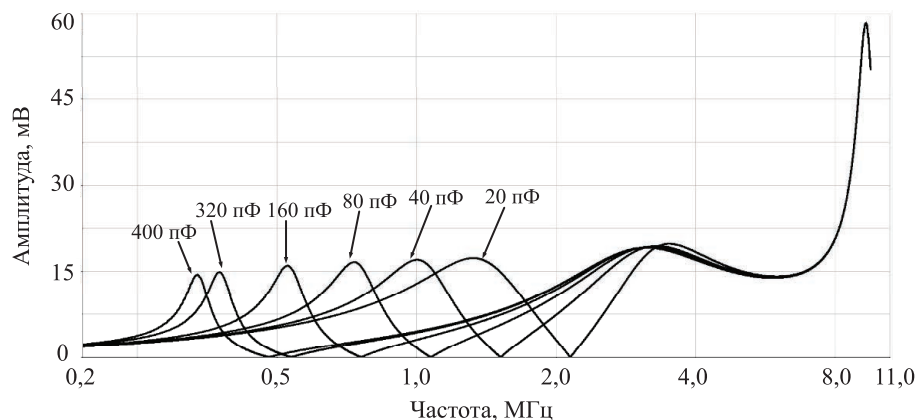


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C3 = \text{var}$
Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the cascade with double autotransformer coupling for $C3 = \text{var}$

Эквивалентная схема каскада, изображенного на рис. 2, соответствует рис. 5, а (где Z_c – импеданс источника сигнала, $Z_c = R_c + 1/j\omega C_c$), а на рис. 5, b представлен сигнальный граф.

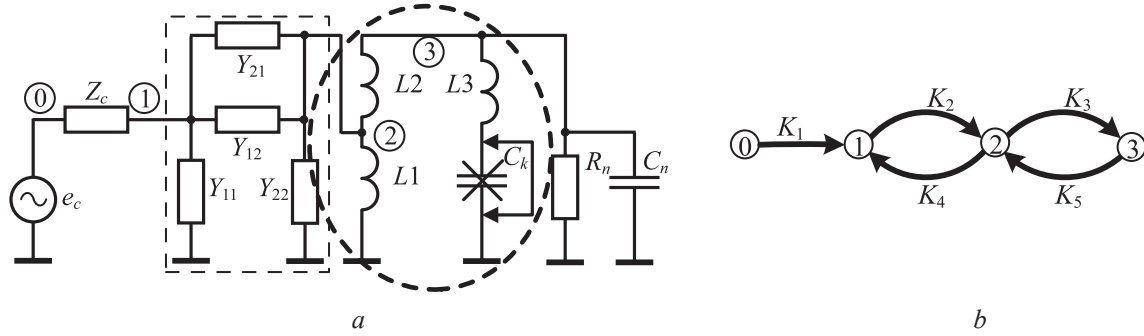


Рис. 5. Эквивалентная схема каскада (a) и сигнальный граф (b)
Fig. 5. Equivalent circuit of the cascade (a) and signal graph (b)

Расчет коэффициентов передачи ветвей графа на рис. 5, b производился по формулам:

$$K_1 = \frac{Y_c}{Y_c + Y_{11}}; K_2 = \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; K_3 = \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_n + \frac{1}{Z_{Ck} + Z_{L3}}}; K_4 = \frac{Y_{12}}{Y_c + Y_{11}}; K_5 = \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}},$$

где $Y_c = 1/R_c + j\omega C_c$; $Y_n = 1/R_n + j\omega C_n$; $j\omega$ – комплексная текущая круговая частота; $Z_{Ck} = 1/Y_{Ck}$; $Y_{Ck} = j\omega C_k$; $Y_{L1} = 1/R_p - j1/\omega L_1$; $Y_{L2} = 1/R_p - j1/\omega L_2$; $Z_{L3} = 1/Y_{L3}$; $Y_{L3} = 1/R_p - j1/\omega L_3$; R_p – сопротивление потерь в катушках индуктивности; Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} – входная проводимость, проводимость обратной и прямой передачи, выходная проводимость биполярного транзистора соответственно.

Передаточная функция цепи в соответствии с графом определяется по формуле Мэзона

$$T = \frac{K_1 K_2 K_3}{1 - K_2 K_4 - K_3 K_5}. \quad (1)$$

После элементарных преобразований получаем

$$T = \frac{Y_{21} Y_{L2} (Y_{Ck} + Y_{L3})}{(Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}) [Y_n (Y_{Ck} + Y_{L3}) + Y_{Ck} Y_{L3}] + (Y_{22} + Y_{L1}) (Y_{Ck} + Y_{L3}) Y_{L2}}. \quad (2)$$

В формуле (2) сомножитель в числителе определяет нуль коэффициента передачи всей цепи

$$Y_{Ck} + Y_{L3} = j\omega C_k + 1/j\omega L_3 = (1 - \omega^2 L_3 C_k) / j\omega L_3. \quad (3)$$

Для выяснения природы остальных упомянутых выше явлений рассмотрим подробнее схему выходной цепи. На частотах, значительно превышающих основную резонансную частоту, сопротивление контурного конденсатора C_k стремится к нулю. Поэтому можно считать, что нижний вывод катушки L_3 подключен к общему проводу (на рис. 5, а показана закорачивающая перемычка). Передаточная функция выходной цепи в этом случае определяется выражением

$$\begin{aligned} T_{\text{вых}} &= \frac{K_2 K_3}{1 - K_3 K_5} = \frac{\frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}} \cdot \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{L3} + Y_n}}{1 - \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{L3} + Y_n} \cdot \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}} = \\ &= \frac{Y_{21} Y_{L2}}{Y_{22} Y_{L2} + Y_{22} Y_{L3} + Y_{22} Y_n + Y_{L1} Y_{L2} + Y_{L1} Y_{L3} + Y_{L1} Y_n + Y_{L2} Y_{L3} + Y_{L2} Y_n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем некоторые упрощающие допущения. Проводимость $Y_{22} = 1/Z_{22}$, где импеданс Z_{22} – это внутреннее выходное сопротивление транзистора, которое можно считать идеальным и принять $Z_{22} = \infty$, или $Y_{22} = 0$. Также будем считать, что активное сопротивление нагрузки $R_n = \infty$. Тогда после преобразований получим

$$T_{\text{вых}} = \frac{Y_{21}Y_{L2}}{Y_{L1}Y_{L2} + Y_{L1}Y_{L3} + Y_{L1}Y_n + Y_{L2}Y_{L3} + Y_{L2}Y_n} = \frac{j\omega L_1 L_3 Y_{21}}{L_1 + L_2 + L_3 - \omega^2 L_3 C_n (L_1 + L_2)}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что нагрузочная цепь действительно обладает резонансной частотой

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_3(L_1 + L_2)C_n}} = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{экв}}C_n}}, \quad (6)$$

чем и объясняется появление всплеска амплитуды на частоте f_{02} выше основной рабочей частоты во всех эпизодах моделирования цепи в программе Multisim (рис. 3). В (6) L_1, L_2, L_3 – индуктивности катушек; $L_{\text{экв}}$ – эквивалентная индуктивность. Так как избавиться от этого резонанса невозможно, то рекомендация может заключаться только в максимальном уменьшении емкости нагрузки.

Рассмотрим явление, связанное с ростом резонансного коэффициента передачи и подъемом АЧХ в широкой области частот на всем протяжении выше резонансной рабочей частоты. Для этого упростим схему СЦ, принимая $C_n = 0, R_n = \infty$. Из рис. 4 видно, что в этом случае эквивалентная нагрузка для выходного источника тока транзистора до частоты резонанса f_{01} укороченной коллекторной цепи имеет индуктивный характер, что приводит к росту выходного напряжения с увеличением частоты, а коэффициент передачи из узла 2 в узел 3 (рис. 5) является частотно независимым и определяется соотношением индуктивностей L_2 и L_3 . И это справедливо для любых значений контурной емкости C_k .

Таким образом, основные причины искажения формы АЧХ цепи с двойной автотрансформаторной связью заключаются в наличии сильной связи между коллектором транзистора и выходом СЦ, которая определяется параметрами индуктивного делителя, образованного обмотками автотрансформатора.

Модернизация выходной согласующей цепи

Устранить сильную связь между выходом источника сигнала и выходом цепи можно, применив СЦ с двумя параллельными автотрансформаторами (рис. 6). Элементом связи между выходом источника сигнала и выходом цепи здесь является фильтр, состоящий из элементов $L2$ и $C3$, коэффициент передачи которого в диапазоне частот, выше основной резонансной, уменьшается с ростом частоты, что и обеспечивает увеличение затухания вне рабочей полосы частот и улучшение избирательности каскада по побочным каналам.

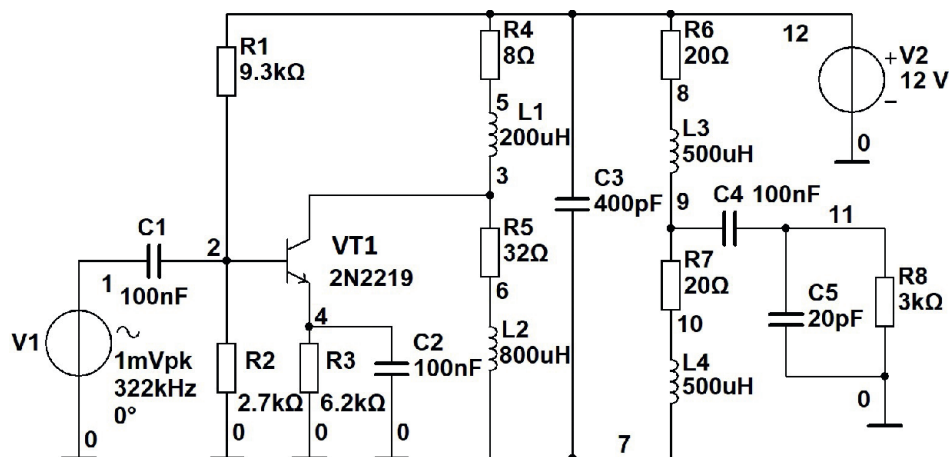


Рис. 6. Схема каскада с двумя параллельными автотрансформаторами
Fig. 6. Schematic diagram of a cascade with two parallel autotransformers

Результат моделирования модернизированного каскада в Multisim при значениях емкости основного контура $C3 = 400$ пФ и емкости нагрузки $C5$ от 5 до 160 пФ представлен на рис. 7 при линейной шкале по амплитуде. Из рисунка видно, что второй резонанс на частотах f_{02} , выше основного, по-прежнему остается. Но, если при $C5 = 160$ пФ всплеск еще достаточно ярко выражен, хотя и гораздо меньшего уровня, то при $C5 = 80$ пФ всплеска амплитуды уже практически

не наблюдается. Характерного подъема АЧХ в широкой области выше резонансной частоты f_0 в улучшенном варианте из-за фильтра нижних частот $L2C3$ также нет.

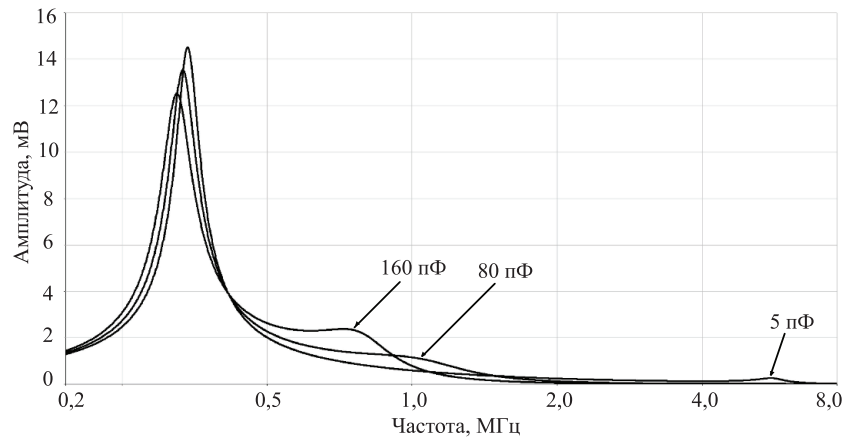


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики с линейной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C5 = \text{var}$
Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics with a linear amplitude scale of the improved cascade at $C5 = \text{var}$

Степень подавления сигналов в области частот вне рабочей полосы можно оценить по рис. 8, где представлен график АЧХ при октавном разбиении амплитудной шкалы.

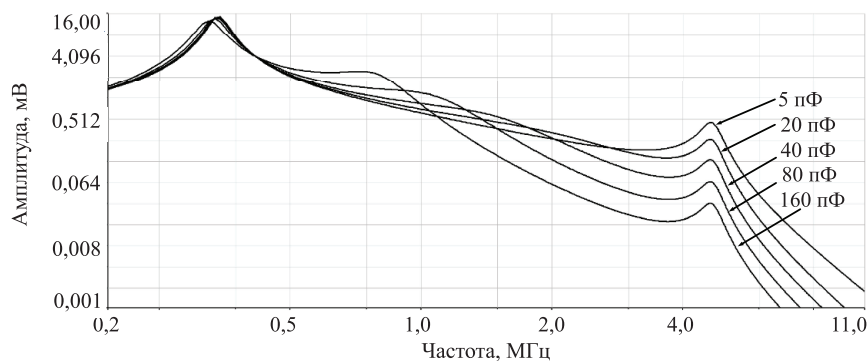


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики с октавной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C5 = \text{var}$
Fig. 8. Amplitude-frequency characteristics with an octave amplitude scale of the improved cascade at $C5 = \text{var}$

На рис. 9 показан результат моделирования модернизированного каскада при постоянной емкости нагрузки $C5 = 20$ пФ и значениях емкости основного контура $C3$ от 20 до 400 пФ при линейной шкале по амплитуде, а на рис. 10 – при октавном разбиении амплитудной шкалы.

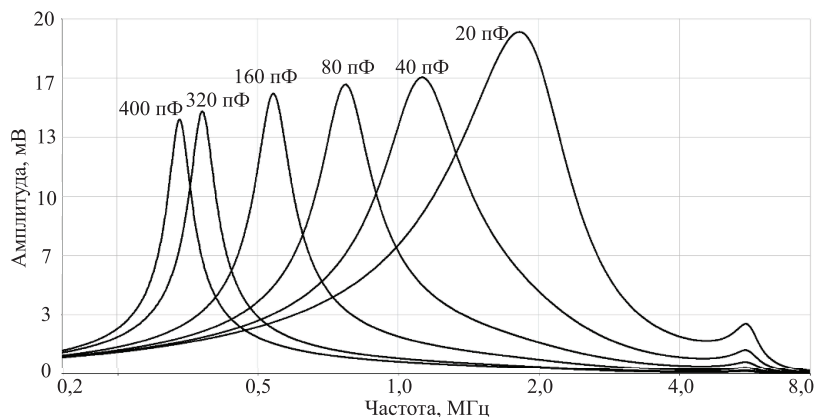


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики с линейной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C3 = \text{var}$
Fig. 9. Amplitude-frequency characteristics with a linear amplitude scale of the improved cascade at $C3 = \text{var}$

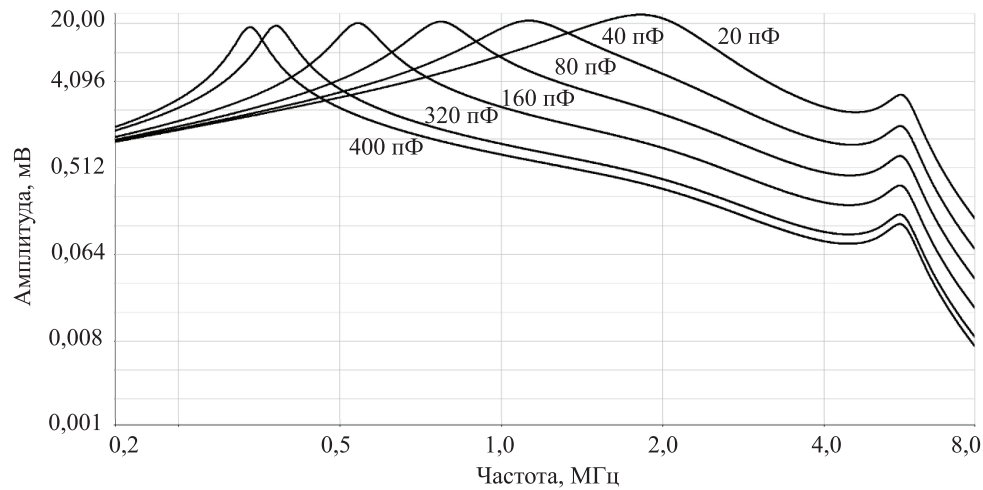


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики с октавной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C3 = \text{var}$

Fig. 10. Amplitude-frequency characteristics with an octave amplitude scale of the improved cascade at $C3 = \text{var}$

По результатам сравнения моделирования на рис. 4 и 9 очевидно, что модернизированный каскад с двумя параллельными автотрансформаторами с точки зрения формы АЧХ обладает значительно более высокими параметрами по сравнению с классической схемой с двойной автотрансформаторной связью. На рис. 11 представлена эквивалентная схема (a) и сигнальный граф (b) улучшенного варианта каскада усилителя радиочастоты.

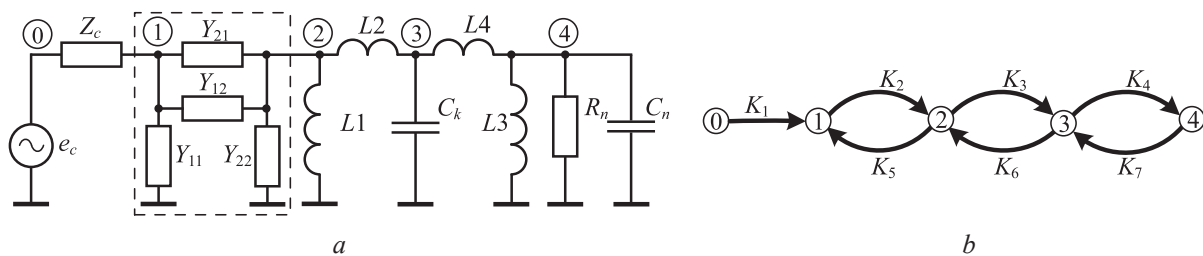


Рис. 11. Эквивалентная схема (a) и сигнальный граф (b) улучшенного варианта каскада усилителя радиочастоты

Fig. 11. Equivalent circuit (a) and signal graph (b) of an improved version of the RF amplifier stage

Передающая функция каскада в соответствии с сигнальным графом на рис. 11, b определяется выражением

$$T = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{1 - K_2 K_5 - K_3 K_6 - K_4 K_7 + K_2 K_5 K_4 K_7}, \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{Y_c}{Y_c + Y_{11}}; \quad K_2 = \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; \quad K_3 = \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{Ck} + Y_{L4}}; \quad K_4 = \frac{Y_{L4}}{Y_{L3} + Y_{L4} + Y_n}; \quad K_5 = \frac{Y_{12}}{Y_c + Y_{11}};$$

$$K_6 = \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; \quad K_7 = \frac{Y_{L4}}{Y_{L2} + Y_{Ck} + Y_{L4}}.$$

Численный расчет полученного выражения подтверждает корректность математической модели и соответствие результатам моделирования в программе Multisim. Таким образом, в результате введения параллельного включения автотрансформаторов, каждый из которых обеспечивает заданную степень связи основного контура с источником и нагрузкой, позволяет улучшить форму АЧХ в широком диапазоне частот и подавить побочные каналы приема.

Заключение

1. Рассмотрен резонансный усилитель радиочастоты с двойной автотрансформаторной согласующей цепью. Представлен анализ передаточной функции каскада с использованием теории сигнальных графов.

2. Установлены причины, ухудшающие форму амплитудно-частотных характеристик и избирательность выходной согласующей цепи с двойной автотрансформаторной связью основного колебательного контура с выходом каскада и нагрузкой.

3. Предложена реализация выходной согласующей цепи с двумя параллельными автотрансформаторами для связи основного контура с выходом каскада и нагрузкой.

4. Результаты моделирования подтверждена работоспособность предлагаемого модернизированного варианта резонансного каскада, обладающего повышенной избирательностью по каналам приема вне рабочей полосы частот.

Список литературы

1. Inder, J. Bahl. *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers* / Inder J. Bahl. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Publ., 2009.
2. Радиоприемные устройства / Н. Н. Фомин [и др.]. М.: Горячая линия–Телеком, 2007.
3. Колосовский, Е. А. Устройства приема и обработки сигналов / Е. А. Колосовский; 2-е изд. М.: Горячая линия–Телеком, 2012.

Поступила 11.03.2025

Принята в печать 14.04.2025

References

1. Inder J. Bahl (2009) *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Publ.
2. Fomin N. N., Buga N. N., Golovin O. V., Kubitsky A. A., Levin V. A., Plaksienko V. S., et al. (2007) *Radio Receivers*. Moscow, Hot Line–Telecom (in Russian).
3. Kolosovskiy E. A. (2012) *Signal Reception and Processing Devices*. Moscow, Hot Line–Telecom (in Russian).

Received: 11 March 2025

Accepted: 14 April 2025

Сведения об авторе

Курочкин А. Е., канд. техн. наук, доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-43
E-mail: kurochkin@bsuir.by
Курочкин Александр Евдокимович

Information about the author

Kurochkin A. E., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-43
E-mail: kurochkin@bsuir.by
Kurochkin Alexander Evdokimovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34>

УДК 621.384.3

РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НЕОХЛАЖДАЕМОГО ТЕПЛОВОГО ДЕТЕКТОРА БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

А. Е. ЖАМОЙТЬ, Я. А. СОЛОВЬЁВ, А. Э. ВИДРИЦКИЙ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В настоящее время неохлаждаемые тепловые детекторы являются одними из наиболее востребованных фотоприемных устройств, поскольку сочетают в себе приемлемые оптические характеристики при отсутствии необходимости поддерживать нужную температуру. Основное преимущество неохлаждаемых тепловых детекторов перед охлаждаемыми – относительная дешевизна изготовления. Из этого следует и основной недостаток – уменьшение чувствительности за счет воздействия температуры внешней среды на прибор. Изменение толщин конструктивных слоев активных элементов микроболометрической матрицы является одним из наиболее легкодоступных способов повышения чувствительности. Путем моделирования спектров поглощения и последующего расчета интегрального коэффициента поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм установлено, что этот коэффициент увеличивается с 60 до 81 % при уменьшении толщины поглощающего слоя из NiCr с 10 до 4 нм. Полученные результаты могут быть использованы для повышения оптических характеристик изготавливаемых неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, отражающий слой, оптический резонатор, чувствительный элемент, ИК-диапазон, коэффициент поглощения, теплоемкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Жамойть, А. Е. Расчет интегрального коэффициента поглощения чувствительного элемента неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа / А. Е. Жамойть, Я. А. Соловьёв, А. Э. Видрицкий // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 29–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34>.

CALCULATION OF THE INTEGRAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE SENSITIVE ELEMENT OF AN UNCOOLED THERMAL DETECTOR OF THE BOLOMETRIC TYPE

ALEKSANDER E. ZHAMOIT, JAROSLAV A. SOLOVJOV, ALEKSANDER E. VIDRITSKIY

JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, uncooled thermal detectors are among the most popular photodetectors, since they combine acceptable optical characteristics without the need to maintain the desired temperature. The main advantage of uncooled thermal detectors over cooled ones is the relative cheapness of manufacture. This also implies the main disadvantage - a decrease in sensitivity due to the effect of the ambient temperature on the device. Changing the thickness of the structural layers of the active elements of the microbolometric matrix is one of the most easily accessible ways to increase sensitivity. By modeling the absorption spectra and then calculating the integral absorption coefficient in the wavelength range from 8 to 14 μm , it was found that this coefficient increases from 60 to 81 % with a decrease in the thickness of the absorbing NiCr layer from 10 to 4 nm. The results obtained can be used to improve the optical characteristics of manufactured uncooled thermal detectors of the bolometric type.

Keywords: photodetector, reflective layer, optical resonator, sensitive element, IR range, integral absorption coefficient, heat capacity.

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

For citation. Zhamoit A. E., Solovjov Ja. A., Vidritskiy A. E. (2025) Calculation of the Integral Absorption Coefficient of the Sensitive Element of an Uncooled Thermal Detector of the Bolometric Type. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 29–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34> (in Russian).

Введение

Фотоприемные устройства (ФПУ) находят широкое применение в различных областях деятельности человека, таких как космическая и военная промышленность, медицинское оборудование. Функционирование неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа обеспечивается в длинноволновой (Long Wavelength Infrared (LWIR), длина волны – от 8 до 14 мкм) области электромагнитного спектра [1–3].

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны с длиной волны от 0,78 мкм до 1,00 мм. При попадании на поверхность металлической пленки или сплава происходит взаимодействие излучения с электронами материала. В металлах свободные электроны могут поглощать энергию ИК-излучения, что приводит к их возбуждению и последующему выделению тепловой энергии. Эффективность поглощения зависит от толщины пленки, оптических свойств материала и длины волны падающего излучения. Тонкие металлические пленки (толщиной от нескольких нанометров до микрометров) могут демонстрировать уникальные оптические свойства, отличающиеся от объемных материалов. Например, они могут быть частично прозрачными для ИК-излучения или иметь повышенное поглощение за счет интерференционных эффектов [4, 5].

Подвешенные структуры используют принцип изменения температуры чувствительного элемента при поглощении инфракрасного излучения. Это изменение температуры приводит к изменению электрических свойств материала (например, сопротивления), что позволяет регистрировать излучение. Толщина поглощающего слоя критична, поскольку должна быть достаточной для обеспечения эффективного поглощения ИК-излучения, но в то же время не слишком большой, чтобы избежать накопления тепла, что может привести к перегреву материала и его разрушению. Таким образом, оптимизация толщины поглощающего слоя является ключевым аспектом в разработке эффективных тепловых систем, использующих ИК-излучение.

Эквивалентная шумовая разность температур (NETD) – важный параметр для оценки качества функционирования ФПУ, особенно в инфракрасной области спектра. Более низкое значение NETD указывает на высокую чувствительность устройства, позволяя ему регистрировать меньшие разности температур.

Коэффициент поглощения материала играет ключевую роль в этом процессе. Высокий коэффициент поглощения позволяет более эффективно улавливать ИК-излучение, что, в свою очередь, способствует снижению NETD. Таким образом, материалы с большими значениями поглощения, такие как никель-хром (NiCr), являются предпочтительными для использования в ФПУ, поскольку обеспечивают минимальную теплоемкость и высокую чувствительность к изменениям температуры. NiCr обладает хорошими термическими свойствами и стабильностью, что делает его подходящим выбором для применения в инфракрасных детекторах, особенно когда речь идет о задачах, требующих высокой точности и чувствительности [6, 7].

В процессе исследований с целью получения максимальных значений выполнены моделирование спектров поглощения и последующий расчет интегрального коэффициента поглощения чувствительного элемента микроболометра в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

Методика проведения исследований

На рис. 1 показаны подвешенные структуры (пиксели), конструктивные слои которых исследуются в данной статье. Наличие отражающего слоя под чувствительным элементом критически важно для улучшения оптических характеристик ФПУ. Он создает резонансную микрополость, которая усиливает сигнал, обеспечивая более эффективное поглощение инфракрасного излучения. Расстояние между чувствительным элементом и отражающим слоем в одну четвертую длины волны обусловлено необходимостью создания резонансного эффекта, который максимизирует поглощение излучения с определенной длиной волны [8].

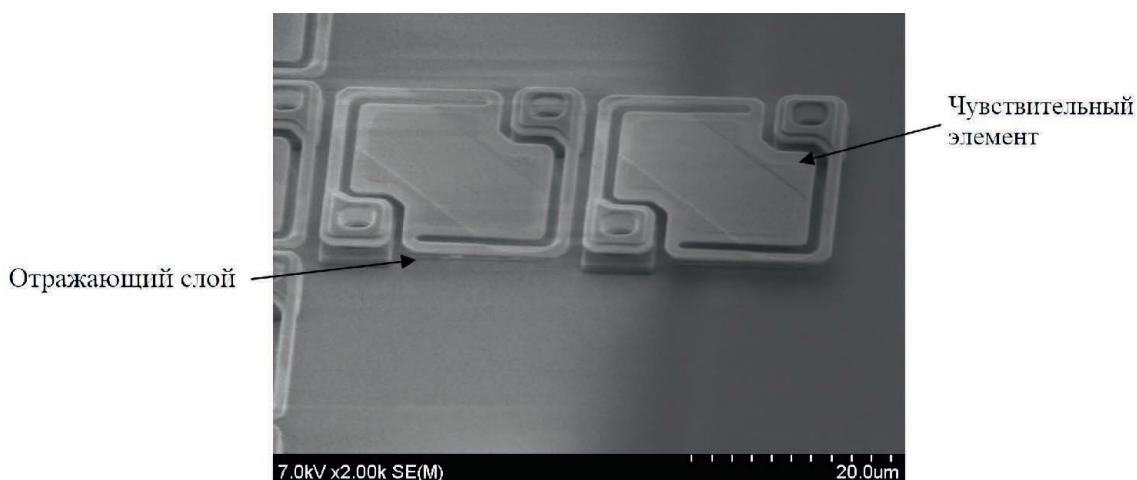


Рис. 1. Внешний вид подвешенной структуры (пикселя) фотоприемного устройства
Fig. 1. External appearance of the suspended structure (pixel) of the photodetector

Выбор вакуумного зазора в 2,5 мкм для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм является следствием получения необходимых условий резонанса для эффективного поглощения инфракрасного излучения. Схематическое изображение конструктивных слоев чувствительного элемента, использованных при проведении исследования, приведено на рис. 2.

Защитный диэлектрик (SiN_x)
Теплопоглотитель (NiCr)
Несущий диэлектрик-2 (SiN_x)
Термочувствительный слой (VO_x)
Несущий диэлектрик-1 (SiN_x)
Вакуумный зазор (2,5 мкм)
Отражающий слой (Al)

Рис. 2. Структура чувствительного элемента микроболометра
Fig. 2. The structure of the sensing element of the microbolometer

Расчеты выполнялись только для области чувствительного элемента, где отсутствует токопроводящий слой из титана (Ti) толщиной 60 нм, который расположен между слоями «Несущий диэлектрик-1» и «Термочувствительный слой». Коэффициент поглощения падающего ИК-излучения в области с Ti не приводит к изменению температуры «Термочувствительного слоя» в достаточной степени, которую можно зарегистрировать ввиду быстрого теплоотвода в металлической пленке.

Оценка влияния толщины слоя «Теплопоглотитель» из NiCr на поглощение чувствительного элемента проводилась для четырех вариантов структуры: 10, 7, 4 и 2 нм. При этом толщины слоев «Несущий диэлектрик-1», «Несущий диэлектрик-2», «Защитный диэлектрик» составляли 70 нм. Толщина «Термочувствительного слоя», состоящего из оксида ванадия, – 100 нм.

Для моделирования спектров поглощения ИК-излучения чувствительным элементом использовалась система COMSOL Multiphysics. Расчет выполнялся для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм с использованием метода конечных разностей во временной области [9]. Данный способ проведения расчетов является эффективным подходом к решению уравнений Максвелла, позволяя с приемлемой точностью моделировать оптические параметры поглощения, пропускания и отражения во всем исследуемом спектре за один расчет.

Для получения работоспособной модели чувствительного элемента в САПР COMSOL Multiphysics необходимо задание оптических постоянных n и k . Их расчет проводился путем из-

мерения коэффициентов пропускания и поглощения на ИК-Фурье-спектрометре Vertex 70 изготовленных экспериментальных образцов с единичными пленками слоев, из которых формировался термочувствительный элемент. Такой способ получения необходимой модели позволяет утверждать о достаточной степени достоверности результатов.

После получения спектров поглощения проведен расчет интегрального коэффициента поглощения для совокупной оценки эффективности оптической системы в исследуемом диапазоне длин волн.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 приведены результаты моделирования спектров поглощения исследуемых структур в диапазоне длин волн λ от 8 до 14 мкм.

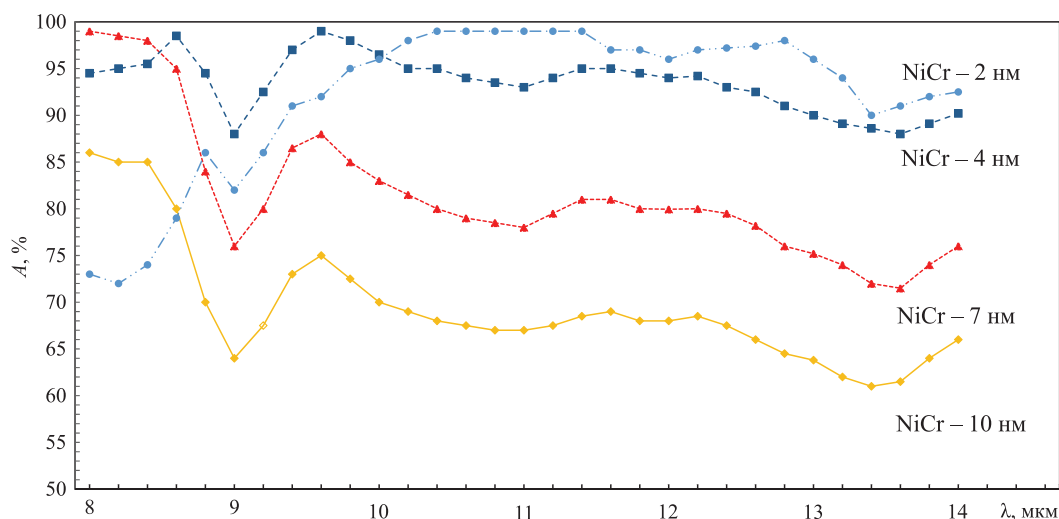


Рис. 3. Результаты моделирования спектров поглощения
Fig. 3. Simulation results of absorption spectra

Из рис. 3 видно, что при уменьшении толщины поглощающего слоя из NiCr с 10 до 2 нм в диапазоне λ от 10 до 14 мкм происходит увеличение поглощения ИК-излучения чувствительным элементом пикселя. При этом с уменьшением толщины NiCr с 7 до 4 нм и с 4 до 2 нм уменьшается поглощение в диапазоне длин волн от 8,0 до 8,8 мкм и от 8 до 10 мкм соответственно, что обусловлено увеличением коэффициента пропускания ИК-излучения A через многослойную структуру.

Для комплексной оценки поглощения исследуемых структур в рассматриваемом диапазоне длин волн проводился расчет интегрального коэффициента поглощения, результаты которого представлены на рис. 4.

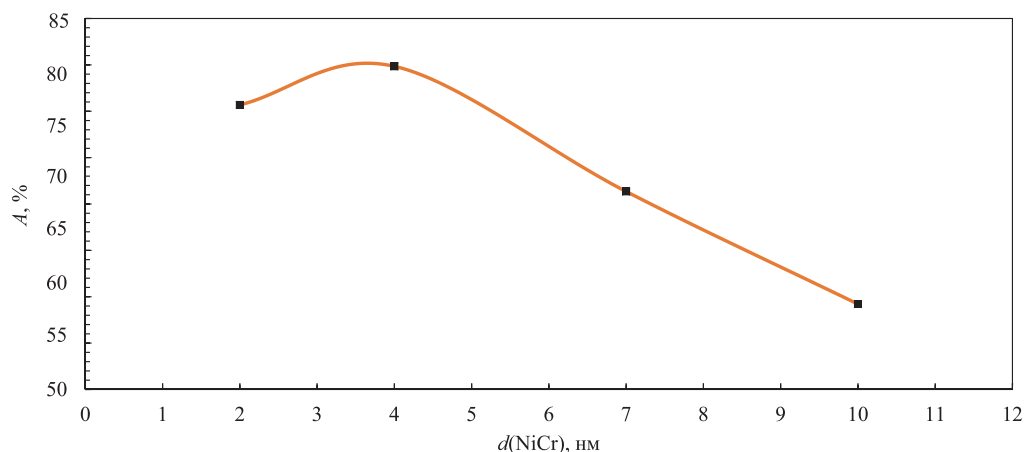


Рис. 4. Результаты расчета интегрального коэффициента поглощения
Fig. 4. The results of the calculation of the integral absorption coefficient

Из рис. 4 видно, что при уменьшении толщины d слоя «Теплопоглотитель» из NiCr с 10 до 4 нм происходит увеличение коэффициента поглощения ИК-излучения A в исследуемом диапазоне длин волн с 60 до 81 %. При этом дальнейшее уменьшение толщины до 2 нм, приводит к уменьшению коэффициента поглощения до 76 %.

Заключение

1. Исследовано влияние толщины слоя из NiCr на поглощение инфракрасного излучения чувствительным элементом пикселя фотоприемного устройства. Для расчета оптических постоянных n и k измерялись коэффициенты отражения и пропускания экспериментальных образцов единичных пленок, из которых формировался чувствительный элемент. Получены спектры поглощения для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм.

2. Расчетным путем установлено, что уменьшение толщины поглощающего слоя NiCr с 10 до 4 нм приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения падающего инфракрасного излучения на чувствительный элемент пикселя с 60 до 81 %.

Список литературы

1. Микроболометрический детектор, чувствительный в двух спектральных диапазонах / С. А. Жукова [и др.] // Прикладная физика. 2016. Т. 4. С. 67–72.
2. Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приемника ИК изображения на основе термопары / С. А. Федирко [и др.] // Проблема разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016: тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. 2016. Т. 4. С. 59–64.
3. Матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов / М. А. Демьяненко [и др.] // Оптический журнал. 2009. Т. 76, вып. 12. С. 5–11.
4. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ИК излучения на основе золь-гель VO_x / В. Н. Овсяк [и др.] // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 114–117.
5. Зверев, В. А. Оптические материалы. Часть 2 / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. СПб.: НИУ ИТМО, 2013.
6. Рогальский, А. Инфракрасные детекторы / А. Рогальский; пер. с англ. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003.
7. Uncooled Thermal MWIR Imagers for High-Temperature Imaging Applications / M. Michel [et al.] // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX. 2023.
8. Smith, P. W. A Bistable Fabry-Perot Resonator / P. W. Smith, E. H. Turner // Applied Physics Letters. 1977. Vol. 30, No 6. P. 280–281.
9. Finite-Difference Time-Domain Methods / F. L. Teixeira et al.] // Nat Rev Methods Primers. 2023. Vol. 3.

Поступила 28.02.2025

Принята в печать 09.04.2025

References

1. Zhukova S. A., Turkov V. E., Demin S. A., Troshin B. V. (2016) Microbolometer Detector That is Sensitive in Two Spectral Bands. *Applied Physics*. 4, 67–72 (in Russian).
2. Fedirko V. A., Hafizov R. Z., Fetisov E. A. (2016) Optimal Design of MEMS Thermopile Element for IR Imager Array. *The Problem of Developing Promising Micro- and Nanoelectronic Systems – 2016, Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference*. 4, 59–63 (in Russian).
3. Demyanenko M. A., Isaev D. G., Avsiuk V. N., Fomin B. I., Aseev A. L., Knyazev B. A., et al. (2009) Matrix Microbolometric Receivers for Infrared and Terahertz Ranges. *Optical Journal*. 76 (12), 5–11 (in Russian).
4. Ovsyuk V. N., Shashkin V. V., Demyanenko M. A., Fomin B. I., Vasilyeva L. L., Soloviev A. P. (2005) Uncooled Microbolometric IR FPA Based on Sol-Gel VO_x . *Applied Physics*. (6), 114–117 (in Russian).
5. Zverev V. A., Krivopustova E. V., Tochilina T. V. (2013) *Optical Materials. Part 2*. Saint Petersburg, ITMO Research Institute (in Russian).
6. Rogalsky A. (2003) *Infrared Detectors Translated from English by A. V. Wojciechowski*. Novosibirsk, Nauka Publ. (in Russian).
7. Michel M., Blaesser S., Litke A., Zakizade E., Weyers S., Weiler D. (2023) Uncooled Thermal MWIR Imagers for High-Temperature Imaging Applications. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX*.
8. Smith P. W., Turner E. H. (1977) A Bistable Fabry-Perot Resonator. *Applied Physics Letters*. 30 (6), 280–281.

9. Teixeira F. L., Sarris C., Yisong Zhang, Dong-Yeop Na, Berenger J.-P., Su Y., et al. (2023) Finite-Difference Time-Domain Methods. *Nat Rev Methods Primers*. 3.

Received: 28 February 2025

Accepted: 9 April 2025

Вклад авторов

Жамойть А. Е., Видрицкий А. Э. провели исследование и анализ полученных результатов под научным руководством Я. А. Соловьёва.

Authors' contribution

Zhamoit A. E., Vidritskiy A. E. conducted a study and analysis of the results obtained under the scientific supervision of Ja. A. Solovjov.

Сведения об авторах

Жамойть А. Е., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов науч.-технич. центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компании холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Соловьёв Я. А., д-р. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Видрицкий А. Э., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов науч.-технич. центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Корженевского, 16, каб. 247
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 198-59-49
E-mail: AZhamoit@integral.by
Жамойть Александр Евгеньевич

Information about the authors

Zhamoit A. E., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials Scientific and Technical Center, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Solovjov Ja. A., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Vidritskiy A. E., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials Scientific and Technical Center, JSC “INTEGRAL”

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo St., 16, Off. 247
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 29 198-59-49
E-mail: AZhamoit@integral.by
Zhamoit Aleksander Evgen'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН В ХОТ-СПОТАХ 5G

В. И. МОРДАЧЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Декларируемое увеличение территориальной плотности трафика мобильной связи до 10^7 бит/с/м² в сетях 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G может быть причиной недопустимого роста уровня электромагнитного фона, особенно в хот-спотах внутри помещений, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания населения максимальна. Предложена методика анализа и выполнены оценки средних уровней электромагнитного фона в различных конфигурациях типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G диапазонов частот FR1 и FR2, свидетельствующие о существенном вкладе излучений абонентских терминалов в средние уровни создаваемого радиочастотного электромагнитного фона. Проанализированы возможности безопасной для населения реализации этого сценария, связанные с использованием технологии MIMO и антенн базовых станций, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые абонентские терминалы.

Ключевые слова: мобильная связь, 5G, eMBB, хот-спот, базовая станция, абонентский терминал, территориальная плотность трафика, спектральная эффективность, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Радиочастотный электромагнитный фон в хот-спотах 5G // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 35–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45>.

RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC BACKGROUND IN 5G HOT SPOTS

VLADIMIR I. MORDACHEV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The declared increase in area traffic capacity of mobile communications to 10^7 bit/s/m² in 5G systems and to 10^9 bit/s/m² in 6G systems may cause an unacceptable increase in the level of electromagnetic background, especially in indoor hot spots, where the intensity of wireless public information services is maximum. A methodology for analyzing and assessing the average electromagnetic background levels in various configurations of the typical 5G scenario Indoor Hotspot-eMBB at frequency ranges FR1 and FR2 is proposed, indicating a significant contribution of subscriber terminal radiations to the average levels of the generated radio frequency electromagnetic background. The possibilities of safe implementation of this scenario for the population are analyzed, associated with the use of MIMO technology and base station antennas that provide adaptive formation of narrow beams in the direction of the subscriber terminals being served.

Keywords: mobile communications, 5G, eMBB, hot spot, base station, users' equipment, area traffic capacity, spectral efficiency, electromagnetic background.

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

For citation. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background in 5G Hot Spots. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 35–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45> (in Russian).

Введение

Планируемый рост средней территориальной плотности трафика мобильной связи (area traffic capacity) до 10^7 бит/с/м² в сетях 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G [1–3] определяет актуальность разработки практической методики анализа и выполнения оценок ожидаемой интенсивности создаваемого при этом электромагнитного фона (ЭМФ), в первую очередь в хот-спотах внутри зданий, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания максимальна. Подобная методика может быть разработана на основе подхода [4, 5] к изучению статистических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых пространственно распределенными источниками излучений, используемого при анализе характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) сотовой связи, распределенных по территории.

Цель исследований – применение подходов [4, 5] к анализу характеристик ЭМО в хот-спотах внутри помещений при реализации типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G, предложенного в [1], в диапазонах FR1 и FR2, а также выполнение оценок средней интенсивности и безопасности создаваемого при этом ЭМФ.

Статистические характеристики ансамбля радиочастотных электромагнитных полей базовых станций в точке наблюдения

При типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB в системах 5G [1] БС размещаются на потолке помещения площадью $S_{HP} = 120 \text{ м} \times 50 \text{ м} = 6000 \text{ м}^2$ на высоте $H_{BS} = 3 \text{ м}$, а АТ и точка наблюдения (ТН) располагаются на высоте $H_{UE} = 1,5 \text{ м}$ над полом (рис. 1), так что расстояние между условными плоскостями размещения БС и АТ $H = H_{BS} - H_{UE}$ составляет 1,5 м.

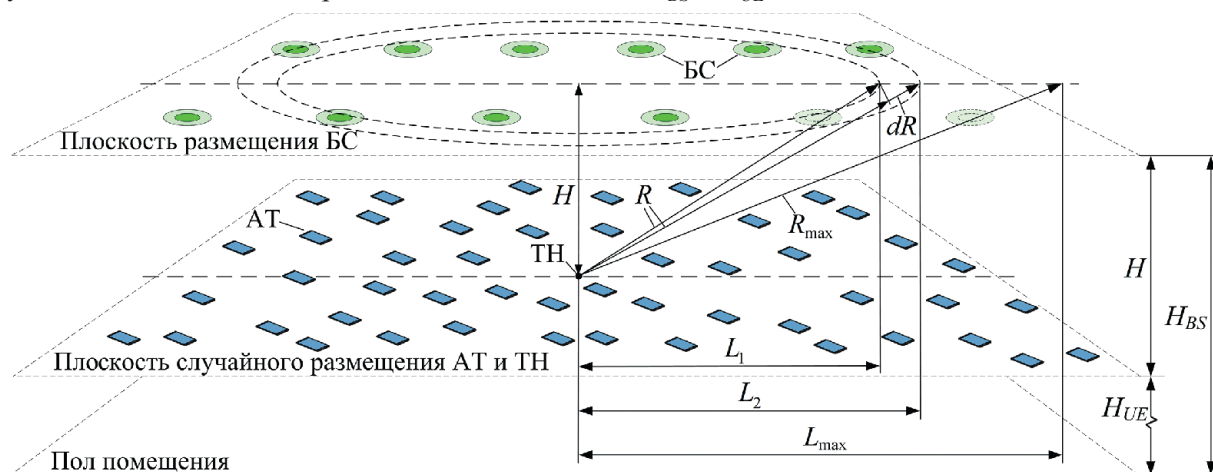


Рис. 1. Пространственное размещение базовых станций, абонентских терминалов и точек наблюдения при типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB реализации услуг сверхширокополосной мобильной связи 5G в помещении

Fig. 1. Spatial placement of base stations, subscriber terminals and observation points in a typical Indoor Hotspot-eMBB scenario for the implementation of 5G ultra-broadband mobile communication services indoors

При данном сценарии БС располагаются регулярно двумя рядами вдоль помещения с шагом 20 м и с расстоянием 20 м между рядами, их количество $N_{BS} = 12$. АТ располагаются случайно, на каждую БС приходится 10 АТ; их общее количество в помещении $N_{UE} = 10N_{BS}$. Координаты расположения ТН на условной плоскости расположения АТ случайны, так что расположение БС и АТ относительно ТН также является случайным. Это позволяет воспользоваться подходом [4] к определению статистических характеристик ЭМО, создаваемой в ТН радиочастотными ЭМП этих БС и АТ.

Рассмотрим пессимистическую модель формирования ЭМО в ТН, при которой условные плоскости пространственного размещения БС и АТ с плотностями $\rho_{BS} = N_{BS}/S_{HP}$ и $\rho_{UE} = N_{UE}/S_{HP}$ соответственно не ограничиваются размерами помещения, а выходят за его пределы и ограничиваются размерами области радиовидимости БС и АТ из ТН. В качестве критерия радиовидимости

из ТН источника ЭМП с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e принимается некоторое пороговое значение плотности потока мощности (ППМ) ЭМП Z_0 , соответствующее, например, чувствительности радиоприема «по полю» в радиосети 5G и связанное с радиусом $R_{\max}$ (для БС на рис. 1) области радиовидимости этого источника из ТН при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве:

$$Z_0 = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}. \quad (1)$$

Под ЭМО в ТН будем понимать присутствующий в ней некоторый ансамбль N ЭМП БС и/или АТ с уровнями, превышающими пороговое значение (1). Исследуемой интегральной характеристикой ЭМО в ТН является интенсивность Z_{Σ} ЭМФ, определяемого в виде скалярной суммы ППМ $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ присутствующих в ней N ЭМП:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0. \quad (2)$$

Если в пессимистической модели пространственная плотность БС – точечных источников ЭМП на условной плоскости, поднятой на высоту H над плоскостью размещения ТН и АТ, постоянна ($\rho_{BS} = \text{const}$), то их среднее число в круговой области над ТН, ограниченной некоторым радиусом $R_{\max}$, определяется по формуле

$$N_{\Sigma BS} = \rho_{BS} \pi L_{\max}^2 = \rho_{BS} \pi (R_{\max}^2 - H^2),$$

где $L_{\max}$ – соответствует области расположения БС, ЭМП которых учитываются в уровне (2) суммарного ЭМФ.

БС – точечные источники ЭМП, удаленность которых от ТН не превышает R , распределены равномерно по круговой области радиуса L_1 плоскости на высоте H . Их среднее число N_1 определяется из выражения

$$N_{1BS} = \rho_{BS} \pi L_1^2 = \rho_{BS} \pi (R^2 - H^2).$$

БС, удаленность которых от ТН не превышает $R + dR$, располагаются в круге радиусом L_2 ; их среднее число:

$$N_{2BS} = \rho_{BS} \pi L_2^2 = \rho_{BS} \pi ((R + dR)^2 - H^2) = \rho_{BS} \pi (R^2 + 2RdR + (dR)^2 - H^2) = N_{1BS} + \rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2).$$

БС, попадающие в элементарный интервал шириной dR значений удаленности от ТН, находящийся на расстоянии R от этой точки, располагаются в узкой кольцевой области, ограниченной радиусами L_1 и L_2 ; их среднее число в данной области:

$$dN = N_{2BS} - N_{1BS} = \rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2).$$

Вероятность $p(R, dR)$ попадания значения удаленности некоторой БС (точечного источника ЭМП, произвольно выбранного из $N_{\Sigma BS}$) в интервал $\{R, R + dR\}$ определяется из выражения

$$p(R, dR) = \frac{dN}{N_{\Sigma BS}} = \frac{\rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2)}{\rho_{BS} \pi (R_{\max}^2 - H^2)} = \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max} = \sqrt{L_{\max}^2 + H^2}.$$

Плотность распределения вероятности (п.р.в.) $w(R)$ удаленности R произвольно выбранной БС от ТН определится соотношением

$$w(R) = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{p(R, dR)}{dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2 dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2R + dR}{L_{\max}^2} \approx \frac{2R}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max}.$$

Иногда удобнее это распределение использовать в следующем виде:

$$w(R) = 2R / (R_{\max}^2 - H^2), \quad H \leq R \leq R_{\max}. \quad (3)$$

Таким образом, для модели случайного равномерного распределения источников ЭМП на плоскости, располагаемой на некоторой высоте над плоскостью расположения ТН, вид п.р.в. удаленности источников от ТН не зависит от этой высоты; от нее зависят лишь область определения и нормирующий множитель этой п.р.в.

Для последующего определения п.р.в. ППМ ЭМП, создаваемых излучениями БС в ТН, необходимо оценить возможность использования в рассматриваемой пространственной модели на рис. 1 зависимости (1), характерной для условий РРВ в свободном пространстве. Эта зависимость теряет адекватность при многолучевом РРВ, характерном при расположении БС за пределами брейкпойнт-окрестности ТН радиусом $R_{BP} = 4H_{BS}H_{UE}/\lambda$ [6], где λ – длина волны ЭМП. Поскольку для сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G рекомендуется рассматривать полосы частот 4, 30 и 70 ГГц [1, 2], для которых $R_{BP} \geq 240$ м, что существенно превышает размеры пространственной области этого сценария (120×50 м), условия РРВ в анализируемой модели можно считать соответствующими условиям РРВ в свободном пространстве с зависимостью (1) между ППМ ЭМП Z в ТН и ее удаленностью R от БС – источника ЭМП с ЭИИМ P_e .

При монотонной функциональной зависимости (1) $Z = \Phi(R)$, характерной для условий РРВ в свободном пространстве, и при одинаковой ЭИИМ БС – источников ЭМП в нижней полусфере (квазиизотропные источники ЭМП, $P_e = \text{const}$) п.р.в. $w(Z)$ в ансамбле ЭМП БС в ТН определяется из (1) и (3) следующим образом [4]:

$$w(Z) = w(R = \Phi^{-1}(Z)) \left| \frac{dR}{dZ} \right|, Z = \Phi(R) = \frac{P_e}{4\pi R^2}, R = \Phi^{-1}(Z) = \left(\frac{P_e}{4\pi Z} \right)^{\frac{1}{2}}, \left| \frac{dR}{dZ} \right| = \left(\frac{P_e}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} Z^{-\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$w(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min}) Z^2}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}. \quad (5)$$

Очевидно, что область определения значений $Z \in [Z_{\min}, Z_{\max}]$ однозначно связана с областью определения R и зависимостью $Z = \Phi(R)$:

$$Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}, Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H^2} \rightarrow R_{\max} = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\min}} \right)^{1/2}, H = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\max}} \right)^{1/2}.$$

В рассматриваемом сценарии антенны БС могут представлять собой достаточно сложные системы – активные фазированные антенные решетки (АФАР) с числом элементов до 2^8 – 2^{10} [1, 2]. Поэтому можно предположить их реализацию с ослаблением задних и боковых лепестков и равномерным усилением G_{0BS} в телесном угле, охватывающем основную часть нижней полусферы, и принять значение P_e БС в этой полусфере, равной $G_{0BS} P_{TRP}$, где P_{TRP} – полная излучаемая мощность БС (параметр Total Radiated Power в [7]).

Первый начальный момент распределения (5) определяется следующим соотношением:

$$m_1(Z) = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z w(Z) dZ = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \frac{dZ}{Z} = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}. \quad (6)$$

Для рассматриваемой модели пространственного распределения БС:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\min} Z_{\max} &= \frac{P_e^2}{16\pi^2 R_{\max}^2 H^2}; \quad Z_{\max} - Z_{\min} = \frac{P_e (R_{\max}^2 - H^2)}{4\pi R_{\max}^2 H^2}; \quad \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = 2 \ln \frac{R_{\max}}{H}; \\ m_1(Z) &= \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{2\pi (R_{\max}^2 - H^2)} \ln \frac{R_{\max}}{H}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, соотношение для средней интенсивности $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ, создаваемого в ТН множеством БС из области радиовидимости, приобретает следующий вид:

$$Z_{\Sigma BS} = N_{\Sigma BS} m_1(Z) = \frac{\rho_{BS} P_e}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H}; \quad (8)$$

$$B_{BS} = \rho_{BS} P_e \approx \rho_{BS} P_{TRP} G_{0BS}, \quad (9)$$

где $R_{\max}$ – параметр, не обязательно связанный с пороговым уровнем ППМ ЭМП в ТН, а лишь ограничивающий радиус круговой области размещения БС с квазиизотропным излучением в нижнюю полусферу, ЭМП которых учитываются при формировании ЭМФ в ТН; B_{BS} – средняя электромагнитная нагрузка на территорию (ЭМНТ) [5], создаваемая излучениями БС в помещении; G_{0BS} – коэффициент направленного действия (КНД) антенны БС в главном лепестке.

Соотношения (8), (9) позволяют оценить среднюю ЭМНТ B_{BS} и среднюю интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$, создаваемых излучениями БС на условной плоскости размещения АТ и ТН при известных ρ_{BS} , G_{0BS} и P_{TRP} , но не обеспечивают возможности этих оценок для анализа реализуемости в данных условиях декларируемых системных характеристик рассматриваемого сценария 5G. Такой анализ возможен с применением иного подхода к определению ЭМНТ, опирающегося не на фактические данные о мощности излучения БС, а на определение минимально необходимой энергии излучения каждого бита информации по радиоканалам БС→АТ для обеспечения требуемой средней территориальной плотности мобильного трафика (area traffic capacity) S_{tr} с учетом их широкополосности и реальной спектральной эффективности, а также необходимого запаса в излучаемой мощности БС для реализации системообразующих функций сотовой радиосети и учета особенностей условий РРВ.

При известных коэффициенте K_N шума радиоприемника АТ, ширине полосы частот ΔF и реальной средней спектральной эффективности W_{ER} радиоканала БС→АТ, в m раз худшей по отношению к потенциальной W_{EP} , определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона – Хартли, при длине волны ЭМП БС λ , КНД антенны БС G_{0BS} (при использовании направленных антенн БС), радиусе зоны обслуживания БС $R_{\max}$, ограниченной чувствительностью радиоприема АТ, и средней S_{tr} , создаваемой множеством БС на условной плоскости размещения АТ и ТН, на этой плоскости создается следующая ЭМНТ [5]:

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_{\Sigma} (2^{m W_{ER}} - 1) R_{\max}^2 S_{tr}}{\lambda^2 W_{ER} G_{0BS}}; \quad (10)$$

$$S_{tr} = \rho_{BS} W_{ER} \Delta F, W_{ER} = \frac{W_{EP}}{m} \approx \frac{\log_2 CNIR_R}{m^2}, \quad (11)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура окружающей среды, $T_0 = 290$ К; K_N – коэффициент шума радиоприемника АТ, ед.; D_{Σ} – совокупный запас мощности излучения БС в сети 5G, связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь на затухание радиоволн в зданиях, потерь на замирание при РРВ в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом в уровне принимаемого сигнала АТ для реализации хендвера, ед.; $CNIR_R$ – отношение «сигнал/(шум+внутрисистемная помеха)» (carrier-to-noise plus intrasystem interference ratio) в реальном радиоканале БС→АТ, ед.

Средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемая в ТН излучающими АТ с ЭИИМ P_{eUE} , распределенными случайно со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] по условной плоскости на высоте H_{UE} (рис. 1), определяется следующим соотношением [5]:

$$Z_{\Sigma UE} \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{13,2\pi H_{UE}^2}{\lambda^2} \right), H_{UE} \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}, B_{TUE} = \rho_{UE} P_{eUE}, \quad (12)$$

где B_{TUE} – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ в помещении, Вт/м².

Соотношение (12) получено в предположении, что излучения АТ являются изотропными ($G_{0UE} = 1$). При их существенной направленности средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, может быть определена аналогично (9).

Результаты исследований и их обсуждение

Соответствующие [1, 2] значения технических параметров рассматриваемого сценария, содержащихся в (7)–(11), приведены в табл. 1. С использованием этих данных выполнены оценки средней ЭМНТ, создаваемой совокупностями БС и АТ в условной плоскости размещения АТ и ТН, а также следующие оценки средней интенсивности ЭМФ в этой плоскости (для интерва-

ла значений $R_{\max}$, обеспечивающих различную степень перекрытия зон обслуживания отдельных БС, и интервала значений ρ_{BS} , учитывающих неравномерность распределения БС по потолку помещения):

- оценки с использованием (8), (9) среднего уровня $Z_{\Sigma BS}$, определяемого значениями основных параметров ρ_{BS} , P_{TRP} , G_{0BS} , $R_{\max}$ и H сценария Indoor Hotspot-eMBB (вариант 1);
- оценки с использованием (12) среднего уровня $Z_{\Sigma UE}$, определяемого значениями основных параметров ρ_{UE} , P_{eUE} , H_{UE} , а также средней суммарной интенсивности $Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями БС и АТ, и отношением $Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE}$ составляющих суммарного среднего уровня Z_{Σ} ЭМФ в данном сценарии (вариант 1);
- оценки с использованием (8), (10), (11) значений системных параметров 4G/5G/6G, декларируемых в [1–3], в идеализированном случае в предположении, что $W_{ER} = W_{EP}$ (несовершенство процессов передачи данных по радиоканалу БС→АТ полностью компенсируется применением технологии ММО, $m = 1$) и $D_{\Sigma} = 1$, что возможно в силу отсутствия повторения несущих частот излучений БС, значительно уменьшающего уровни внутрисетевых помех (вариант 2);
- оценки с использованием (8), (10), (11) для потенциальных характеристик радиоканала ($m = 1$) и запаса в мощности излучения БС 10 дБ ($D_{\Sigma} = 10$) (вариант 3);
- оценки с использованием (8), (10), (11) для реального радиоканала, в котором несовершенство процессов передачи данных не полностью компенсируется применением технологии ММО ($m = 1,5$), и запаса мощности излучения БС 7 дБ ($D_{\Sigma} = 5$) (вариант 4).

Результаты этих оценок приведены в табл. 2.

Таблица 1. Типовые параметры пространственного размещения и излучения базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G

Table 1. Typical parameters of spatial placement and radiation of base stations

and subscriber terminals for various configurations of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Indoor Hotspot-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Частота F , ГГц (λ , м)	4 (0,075)	30 (0,01)	70 (0,0043)
Параметры БС			
$R_{\max}$, м	15–60	15–60	15–60
H , м	1,5	1,5	1,5
ρ_{BS} , БС/м ²	0,002–0,0025	0,002–0,0025	0,002–0,0025
P_{TRP} , дБм/Вт	24/0,25	23/0,2 ($P_e \leq 58$ дБм)	21/0,125 ($P_e \leq 58$ дБм)
ΔF , МГц	20	80	80
W_{ER} , бит/с/Гц	9	9	9
$S_{tr \max}$, бит/с/м ²	$3,6 \cdot 10^5$ – $4,5 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^6$
G_{0BS} , ед./дБи	3,16/5	3,16/5 ($G_{0BS} \leq 25$ дБи)	3,16/5 ($G_{0BS} \leq 27$ дБи)
K_N , ед./дБ	5/7	10/10	10/10
K_F	1	1	1
Параметры АТ			
H_{UE} , м	1,5	1,5	1,5
Количество АТ	10 АТ/БС	10 АТ/БС	10 АТ/БС
Использование АТ, %	95 (≈ 100)	95 (≈ 100)	95 (≈ 100)
$\rho_{UE} \approx \rho_{BS}$, АТ/м ²	0,0020–0,0025	0,0020–0,0025	0,0020–0,0025
$P_{TRP} \approx P_{eUE}$, дБм/Вт	23/0,2	23/0,2	21/0,125
G_{0UE} , ед./дБи	1/0	3,16/5	3,16/5
Примечания			
1. Анализ ограничен рассмотрением режима FDD, при котором при использовании всех АТ в каждый момент времени дуплексная радиосвязь БС осуществляется только с одним АТ, и территориальная плотность ρ_{UE} излучающих АТ равна территориальной плотности БС.			
2. $S_{tr \max}$ – создаваемая максимальная средняя территориальная плотность трафика; K_F – коэффициент повторения несущих частот.			

Таблица 2. Результаты оценок средней электромагнитной нагрузки на территорию и средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого излучениями базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G
Table 2. Results of assessments of the average electromagnetic load on the territory and the average intensity of the electromagnetic background created by the radiation of base stations and subscriber terminals under various configurations of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Indoor Hotspot-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Оценка средней ЭМНТ и средней интенсивности ЭМФ в ТН, создаваемых излучениями БС			
С использованием (8), (9), (12) – вариант 1			
B_{BS} (9), Вт/м ²	$1,58 \cdot 10^{-3} - 1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3} - 1,58 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-4} - 9,88 \cdot 10^{-4}$
$Z_{\Sigma BS}$ (8), (9), Вт/м ²	$1,82 \cdot 10^{-3} - 3,64 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3} - 2,91 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4} - 1,82 \cdot 10^{-3}$
B_{TUE} (12), Вт/м ²	$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4} - 3,13 \cdot 10^{-4}$
$Z_{\Sigma UE}$ (12) Вт/м ²	$1,94 \cdot 10^{-3} - 2,43 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3} - 3,44 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-3}$
$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$, Вт/м ²	$3,76 \cdot 10^{-3} - 6,07 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-3} - 6,35 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-3}$
$Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE}$	0,9–1,5	0,53–0,85	0,48–0,76
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 1$, $m = 1$ – вариант 2			
B_{BS} (10)	$4,09 \cdot 10^{-7} - 8,18 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-4} - 3,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3} - 0,020$
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$4,71 \cdot 10^{-7} - 1,51 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-4} - 6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3} - 0,037$
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 10$, $m = 1$ – вариант 3			
B_{BS} (10)	$4,09 \cdot 10^{-6} - 8,18 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-3} - 0,037$	0,010–0,200
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$4,71 \cdot 10^{-6} - 1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-3} - 0,068$	0,011–0,370
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 5$, $m = 1,5$ – вариант 4			
B_{BS} (10)	$4,63 \cdot 10^{-5} - 9,27 \cdot 10^{-4}$	0,021–0,420	0,11–2,26
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$5,33 \cdot 10^{-5} - 1,71 \cdot 10^{-3}$	0,024–0,770	0,13–4,16

Приведенные в табл. 2 результаты свидетельствуют о следующем.

1. Для варианта 1 оценки средней интенсивности ЭМФ на всех частотах оказываются существенно ниже предельно допустимых уровней (ПДУ) 0,025–0,400 Вт/м, установленных для многих видов оборудования объектов критической инфраструктуры и населения [8], что свидетельствует об электромагнитной безопасности всех конфигураций сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G с параметрами пространственного размещения и электромагнитного излучения БС и АТ, принятыми в [1, 2]. Для конфигураций B, C этого варианта характерно преобладание среднего уровня ЭМФ, создаваемого излучениями АТ, над средними уровнями ЭМФ, создаваемыми излучениями БС. В действительности следует ожидать сопоставимых значений $Z_{\Sigma BS}$ и $Z_{\Sigma UE}$ при $Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE} \geq 1$ в силу того, что (12) получено в предположении, что АТ имеют антенны с размерами, близкими к $\lambda/2$. Это справедливо для АТ 2G/3G, но не в полной мере адекватно для АТ с многоэлементными антеннами (до 32–64 элементов в конфигурациях B, C [1]), поскольку увеличение размеров антенны по отношению к длине волны сопровождается расширением ее ближней зоны и уменьшением значения $Z_{\max}$ в модели (6) для ансамбля ЭМП АТ в ТН, что вызывает уменьшение средних уровней $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемых излучениями АТ, за счет снижения динамического диапазона значений интенсивности ЭМФ на условной плоскости размещения АТ и ТН. Этот вопрос требует дальнейшего количественного анализа. Тем не менее приведенные результаты свидетельствуют о недостаточности оценок лишь уровней ЭМФ, создаваемого излучениями БС, при оформлении санитарных паспортов подобных объектов и о необходимости обязательного учета в какой-либо форме вклада излучений АТ в ожидаемые уровни совокупного среднего ЭМФ, создаваемого в хот-спотах 5G.

2. Для варианта 2 оценки средней интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями БС, для всех конфигураций данного сценария, а также оценки для конфигурации A вариантов 3, 4 тоже оказываются существенно ниже ПДУ на всех частотах. Это свидетельствует о том, что безопасность всех конфигураций данного сценария может быть обеспечена близкой к потенциальной пропускной способностью радиоканалов БС→АТ ($m = 1$) за счет эффективного применения технологии ММО и обеспечения условий РРВ в свободном пространстве (что в условиях возможного затенения АТ телами их владельцев и местными предметами возможно за счет перекрытия зон обслуживания соседних БС).

3. Для конфигураций *B*, *C* вариантов 3 и 4 оценки средней интенсивности ЭМФ оказываются сопоставимыми со значениями ПДУ либо даже существенно их превосходящими. Это свидетельствует о том, что на частотах диапазона FR2 даже относительно небольшое ухудшение пропускной способности радиоканала по сравнению с потенциальной ($m \geq 1$), как и необходимость обеспечения даже относительно небольшого запаса по уровню сигнала ($D_{\Sigma} \geq 7-10$ дБ), делают невозможной безопасную реализацию деклараций 5G в рамках данного сценария.

В табл. 1 оценки максимальной средней территориальной плотности беспроводного трафика $S_{tr \max}$, полученные с использованием (11), для конфигурации *A* оказались выше предела 10^5 бит/с/м², декларируемого в [1–3] для систем 4G, но более чем на порядок меньше заявленного там же предела 10^7 бит/с/м² для систем 5G. Оценки значений $S_{tr \max}$ для конфигураций *B*, *C*, приведенные в табл. 1, также оказались в 5,5–7 раз меньше указанного предела для систем 5G. Таким образом, реализация рассматриваемого сценария 5G с типовыми параметрами [1, 2] не обеспечивает предельных значений интенсивности S_{tr} беспроводного информационного обслуживания и максимально возможных уровней ЭМФ в хот-спотах 5G; во всех конфигурациях имеются резервы роста ρ_{BS} , позволяющие приблизить уровни S_{tr} к декларируемому пределу для 5G при сохранении безопасных средних уровней ЭМФ.

При фиксированных W_{ER} , ρ_{BS} увеличение средней территориальной плотности беспроводного трафика S_{tr} возможно только за счет расширения полос частот радиоканалов. В миллиметровом диапазоне FR2 5G такое расширение допускается до 1 ГГц ([2], п. 5.2.4.3.15), однако без соответствующего улучшения спектральной эффективности оно должно сопровождаться увеличением излучаемой мощности БС по отношению к заявленной в [1, 2].

Как следует из соотношений (8)–(10), средние уровни ЭМНТ и ЭМФ, создаваемые БС, существенно зависят от направленности излучений БС. КНД антенн БС $G_{0BS} = 5$ дБи, предложенный для базовой реализации типового сценария Indoor Hotspot-eMBB, характерен для слабонаправленных антенн, обеспечивающих постоянство ЭИИМ ($P_e = G_{0BS} P_{TRP} \approx \text{const}$) в телесном угле, стягиваемом зоной обслуживания БС. В то же время для конфигураций *B*, *C* данного сценария в перспективе предусмотрено использование АФАР с КНД лучей $G_{0BS} = 25-27$ дБи, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые АТ (АФАР Massive MIMO). Их использование обеспечит возможность снижения средней интенсивности ЭМФ на два порядка по сравнению со слабонаправленными антеннами БС.

На рис. 2 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для параметров конфигурации *B* при умеренном запасе мощности излучения БС $D_{\Sigma} = 10$ и различных значениях S_{tr} , декларируемых для систем 4G/5G/6G. Семейство кривых на рис. 2, *a* соответствует использованию слабонаправленных антенн, а на рис. 2, *b* – направленных антенн с КНД 25 дБи.

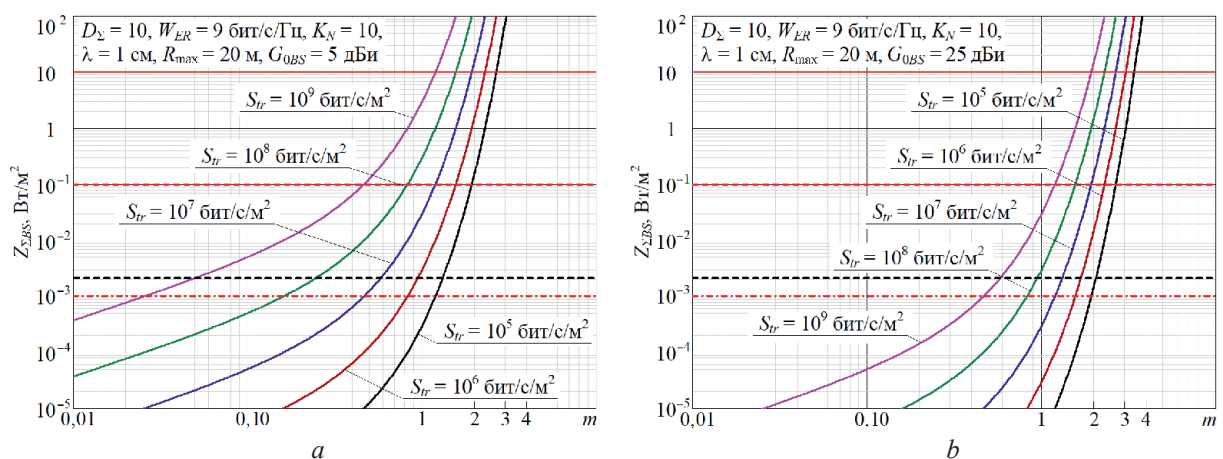


Рис. 2. Зависимость $Z_{\Sigma BS}(m)$ для конфигурации *B* сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G при различной средней территориальной плотности беспроводного трафика:

a – при слабонаправленных антеннах базовых станций; *b* – при использовании в базовых станциях многоэлементных активных фазированных антенных решеток Massive MIMO с направленным излучением

Fig. 2. Dependency $Z_{\Sigma BS}(m)$ for configuration *B* of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario with different average territorial density of wireless traffic: *a* – with weakly directional base station antennas; *b* – when using multi-element active phased array antennas Massive MIMO with directional radiation in base stations

На рис. 2, *a*, *b* горизонтальная сплошная красная линия $Z_{\Sigma BS1} = 10 \text{ Вт/м}^2$ соответствует «тепловым» ограничениям ICNIRP [9] на интенсивность радиочастотного ЭМФ для населения, горизонтальная красная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS2} = 0,1 \text{ Вт/м}^2$ соответствует ПДУ ЭМП, принятому в ряде стран с учетом опасности «нетепловых» эффектов воздействия ЭМП на человеческий организм, а также области ПДУ диапазона FR1 для оборудования критической инфраструктуры [8]; горизонтальная красная штрих-пунктирная линия $Z_{\Sigma BS3} = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ соответствует границе области «уровней особых опасений», установленной стандартами строительной биологии многих развитых стран [10]; горизонтальная черная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS} = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ – среднему уровню ЭМФ, полученному для конфигурации *B* с использованием (8), (9) при $R_{\max} = 20 \text{ м}$, $\rho_{BS} = 0,0025 \text{ БС/м}^2$.

Выбор диапазона изменения значений параметра *m* при расчетах графиков на рис. 2 обусловлен следующим. В системах 5G технология ММО обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности 2–8 раз [11], для систем 6G рост спектральной эффективности радиоканалов декларируется в 5–10 раз по сравнению с системами 5G [3]. Поэтому можно предположить, что в системах 6G этот выигрыш ожидается на уровне 10–80 раз. В современных радиоканалах без использования технологии ММО значение параметра *m* составляет не менее 1,5–2,0 вследствие неидеальности процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, что позволяет ожидать в радиоканалах с ММО значений $m \leq 1$ в системах 5G и $m \leq 0,1$ – в 6G.

Анализ кривых на рис. 2 позволяет сделать следующие выводы.

1. При слабонаправленном излучении БС максимальный уровень $S_{lr} = 10^5 \text{ бит/с/м}^2$, объявленный для систем 4G, может быть условно безопасным ($Z_{\Sigma BS} \leq 0,1 \text{ Вт/м}^2$) при $m \leq 2$, при использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 4G может быть достигнут при $m \leq 2,6$, что обеспечивается минимальным повышением спектральной эффективности за счет ММО.

2. Максимальный уровень $S_{lr} = 10^7 \text{ бит/с/м}^2$, объявленный для систем 5G, при слабонаправленном излучении БС может быть безопасным при $m \leq 1,1$, что требует минимум дву-, трехкратного повышения спектральной эффективности за счет ММО. При использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 5G может быть достигнут при $m \leq 2$, т. е. при умеренном повышении спектральной эффективности за счет ММО.

3. Предел $S_{lr} = 10^9 \text{ бит/с/м}^2$, декларируемый для систем 6G, при слабонаправленном излучении БС может быть безопасным лишь при $m \leq 0,5$, что требует как минимум шести-, восьмикратного повышения спектральной эффективности за счет ММО. При использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 5G может быть достигнут при $m \leq 1,1$, что требует как минимум дву-, трехкратного повышения спектральной эффективности за счет ММО.

4. Эти выводы не учитывают вклада излучений АТ в средний уровень создаваемого ЭМФ. Однако в силу растущей асимметрии удельного трафика АТ (отношения объемов принимаемой и передаваемой информации), достигающей 100 [12], т. е. на порядок превышающей асимметрию трафика при рассмотренном типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB 5G, относительный вклад ЭМП АТ в суммарный уровень ЭМФ также будет меньше полученного для варианта 1 в табл. 2. Тем не менее вклад излучений АТ в среднюю интенсивность ЭМФ в хот-спотах 4G/5G/6G требует дальнейшего изучения.

5. В анализируемом случае без применения технологии ММО и других способов значительного увеличения спектральной эффективности радиоканалов достижение предельных уровней S_{lr} для 5G/6G чревато крайне опасным превышением уровнями ЭМФ даже «тепловых» ПДУ $Z_{\Sigma BS1}$ [9] как при слабонаправленном, так и при направленном излучении БС. Возможность же уменьшения среднего уровня ЭМФ до величин, не вызывающих опасений, при достижении этих предельных значений S_{lr} , маловероятна.

Заключение

1. Представленные результаты анализа позволяют сделать вывод, что реализация типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G с параметрами базовых станций и абонентских терминалов, заявленными в [1, 2], безопасна и для населения, и для оборудования критической инфраструктуры. При этом значительный вклад в интенсивность электромагнитного фона (в конфигурациях *B*, *C* – преобладающий) могут вносить излучения абонентских терминалов, что требует учета при оценках электромагнитной безопасности подобных объектов, в частности, при их санитарно-гигиенической паспортизации.

2. Параметры данного сценария 5G позволяют без ущерба для безопасности приблизиться к максимальной территориальной плотности беспроводного трафика 5G путем увеличения территориальной плотности базовых станций. Дальнейшее же безопасное увеличение в хот-спотах максимальной средней территориальной плотности беспроводного трафика до уровня 10^9 бит/с/м², декларируемого для систем 6G, требует как обеспечения максимально возможной эффективности применяемой технологии ММО в повышении спектральной эффективности радиоканалов, так и использования более сложных базовых станций и абонентских терминалов с многоэлементными активными фазированными антенными решетками Massive ММО, обеспечивающими адаптивное формирование узких лучей с КНД 20–30 дБи, существенно снижающими создаваемую электромагнитную нагрузку на территорию (10) и увеличивающими спектральную эффективность радиоканалов W_{ER} за счет соответствующего увеличения $CNIR_R$ в (11).

3. При анализе безопасности рассмотренного сценария 5G необходимо учитывать, что создаваемый при его реализации уровень электромагнитного фона не в полной мере характеризует безопасность систем 4G/5G, имеющих многоуровневую иерархическую структуру, содержащую множество базовых станций и абонентских терминалов как вне, так и внутри зданий. Поэтому оценки электромагнитного фона, создаваемого системами 4G/5G как в помещениях, так и вне их, должны учитывать присутствие электромагнитных полей и внутренних, и внешних источников, что может быть выполнено с использованием (8)–(12) и результатов [5, 8, 13, 14]. Кроме того, сделанные выше выводы о безопасности рассмотренного сценария 5G справедливы только применительно к технологии FDD, так как для импульсных сигналов TDD 4G/5G, согласно [15], в силу их биологической «агрессивности» необходимо установить существенно более жесткие гигиенические нормативы. Очевидно, что такое же заключение напрашивается и по отношению к предельно допустимым уровням радиочастотных электромагнитных полей для оборудования критической инфраструктуры, которое может располагаться в хот-спотах 5G/6G с технологией TDD.

Список литературы / References

1. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. Report ITU-R M.2412.
2. *The Outcome of the Evaluation, Consensus Building and Decision of the IMT-2020 Process (Steps 4 to 7), Including Characteristics of IMT-2020 Radio Interfaces*. Report ITU-R M.2483.
3. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G. Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
4. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, Belarus State University Publ. https://emc.bsuir.by/m/12_116413_0_176480.pdf (in Russian).
5. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322.
6. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*. Rec. ITU-R. 1411–11.
7. CEPT Report 67. 2018, p. 17. Available: <https://docdb.cept.org/download/118>.
8. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).
9. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020) Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*. 118 (5), 483–524.
10. Maes B. (2008) Standard of Building Biology Testing Methods. *Inst. Building Biol. + Sustainability IBN, Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008*.
11. *LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction. White Paper, 2015, 1ma252_wp_lte_rel12_2e.pdf*. https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-advanced-3gpp-rel-12-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-108294.html.
12. *Ericsson Mobility Reports. 2011–2022*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports> (Accessed 25 August 2024).
13. Mordachev V. I. (2021) Characteristics of the Electromagnetic Environment Created by Radiations of User Equipment of ...4G/5G/6G Cellular (Mobile) Communications in Buildings. *Doklady BGUIR*. 19 (6), 42–50. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50> (in Russian).
14. Mordachev V. (2023) Influence of the Radiating UE Distribution Irregularity in Building Internal Space on the Level of Indoor Electromagnetic Background. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023", Krakow, Poland, Sept. 4–8*.

15. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. (2022) The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *CONCEPCII*. 1 (41), 3–17 (in Russian).

Поступила 19.11.2024

Принята в печать 18.03.2025

Received: 19 November 2024

Accepted: 18 March 2025

Сведения об авторе

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-46-53>

UDC 621.396

DESIGNING, SIMULATING AND ANALYZING OF MICROSTRIP ANTENNA FOR WIRELESS BODY NETWORK USING TWO DIFFERENT TYPES OF SUBSTRATES

RAHAFF F. ALBOUM, ABDALRAHMAN ALBISHTI, HISHAM AYAD

University of Zawia (Az-Zawiya, Libya)

Abstract. Microstrip patch antennas are used in wireless networking due to their flexibility, light weight, and ease of fabrication. This article discusses the designed and simulated microstrip patch antenna for WBAN networks using professional CST Studio Suite 2020 software. The antenna operating frequency was 2.5 GHz, and its substrate was made of FR-4 (lossy) and Rogers RT/Duroid 5880 PCB materials with permittivity of 4.3 and 2.2, respectively. Both materials showed good results, but Rogers RT/Duroid was better with an efficiency of 94.4% because it has excellent performance characteristics that make it more suitable for use in wearable devices. The antenna substrate and ground plane were made of copper with a substrate height of 1.58 mm for Rogers RT/Duroid and 2.8 mm for FR-4. During the research process, an antenna with low return loss and a standing wave ratio value as close as possible to unity was created.

Keywords: microstrip patch antenna, wireless body network, Rogers RT/Duroid material.

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

For citation. Alboum R. F., Albishti A., Ayad H. (2025) Designing, Simulating and Analyzing of Microstrip Antenna for Wireless Body Network Using Two Different Types of Substrates. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-46-53>.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ НАТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОДЛОЖЕК

Р. Ф. АЛБОУМ, А. АЛБИШТИ, Х. АЙАД

Университет Аль-Завия (Эз-Завия, Ливия)

Аннотация. Микрополосковые патч-антенны используются при построении беспроводных сетей благодаря их гибкости, легкости и простоте изготовления. В статье рассмотрена спроектированная и смоделированная микрополосковая патч-антенна для сетей WBAN с использованием профессионального программного обеспечения CST Studio Suite 2020. Рабочая частота антенны составляла 2,5 ГГц, ее подложка изготавливалась из материалов для печатных плат FR-4 (с потерями) и Rogers RT/Duroid 5880 с диэлектрической проницаемостью 4,3 и 2,2 соответственно. Оба материала показали хорошие результаты, но Rogers RT/Duroid оказался лучше с эффективностью 94,4 %, поскольку обладает превосходными эксплуатационными характеристиками, которые делают его более подходящим для использования в носимых устройствах. Подложка и заземление антенны были изготовлены из меди с высотой подложки 1,58 мм для Rogers RT/Duroid и 2,8 мм для FR-4. В процессе исследований создана антенна с низкими обратными потерями и значением коэффициента стоячей волны, максимально приближенным к единице.

Ключевые слова: микрополосковая патч-антенна, беспроводная нательная сеть, материал Rogers RT/Duroid.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Албоум, Р. Ф. Проектирование, моделирование и анализ микрополосковой антенны для беспроводной нательной сети с использованием двух различных типов подложек / Р. Ф. Албоум, А. Албишти, Х. Айад // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-46-53>.

Introduction

In recent years, Wireless Body Area Networks (WBANs) have emerged as a transformative technology in healthcare. These networks include the use of wearable antennas for transmitting and receiving of the data for healthcare related systems [1]. Microstrip patch antennas are being used more and more for wireless communication because they are lightweight, affordable, easy to manufacture, have flexible feed lines, an omnidirectional, two-dimensional field pattern, and work with solid-state equipment.

Microstrip antennas became very popular in the 1970s primarily for spaceborne applications. Today they are used for government and commercial applications [2]. These antennas are easy to make. A common microstrip antenna consists of a metal radiating plate that is attached to one side of a dielectric substrate. On the substrate's other side, a continuous metal layer is attached to the ground plane. This radiating patch is on one side of dielectric substrate ($\epsilon_r \leq 10$), which has a ground plane on other side [3, 4].

There are multiple dielectric materials available in the market for printing antennas. Each dielectric have their own special properties, different dielectric constants, different conduction properties, etc. affecting the fringing waves in the patch antenna, and hence enhancing the overall properties of the antenna [5]. Rogers RT/Duroid 5880 and FR-4 are both used in this research as substrates. Some main key performance parameters that need to be considered for Microstrip Patch Antenna are reflection coefficient bandwidth, input impedance, radiation pattern, surface current, VSWR, gain and return loss.

These antennas can provide constant, discreet monitoring and sensing of several parameters in and on human bodies, including temperature, blood pressure, ECG, EEG, and PH, and other medical applications. But unlike antennas embedded in portable devices, wearable antennas are designed to work in the complicated body-centric environment. Antenna performance near to human body is different than antenna placed in free space [6]. In the future, it is envisaged that each person is going to be wearing multiple sensors on their body being a part of a Body Area Network (BAN) [7].

This research examines the design and structure of a microstrip patch antenna for Wireless Body Antenna (WBAN) applications, focusing on its planar structure and conformability to the human body, utilizing the 2.5 GHz ISM frequency band.

This study explores microstrip patch antenna design principles, including substrate selection, patch shape optimization, and feeding technique. It analyzes performance parameters like return loss, radiation pattern, efficiency, and gain, to design an antenna that works in wireless body area networks, improving health monitoring system efficiency and reliability.

Simulated antenna design

The designed antenna is a microstrip patch antenna (MPA). It is designed to match the WBAN demands such as observing the human vital signs. The MPA simulation was done using the CST software. During the designing process, a systematic approach has been followed, considering various factors such as frequency range, bandwidth requirements, VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) requirements, RL (return loss) and physical constraints. Fig. 1 shows the design of the antenna using the simulation software CST.

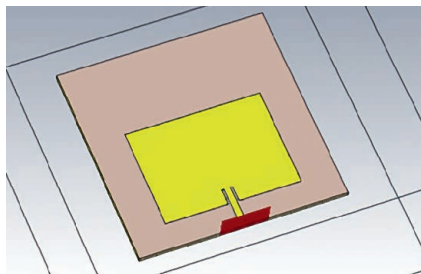


Fig. 1. The antenna's design using CST

Patch design specifications

The proposed wearable patch antenna is designed with microstrip line inset feeding technique. The operating frequency of the antenna is at 2.5 GHz because it can be used in WBAN applications.

A 50 Ω input impedance is used to feed the patch antenna. Two antennas were implemented on two different materials substrates. The first substrate is Rogers RT/Duroid 5880 material and the other one is FR-4 (or FR4). The Antennas' geometrical parameters such as patch length L_p and patch width W_p have been computed using the following steps and formulas mentioned below.

1. Calculate the patch width

$$W_p = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}},$$

where c is the light speed; f_0 is the operating frequency; ϵ_r is dielectric constant.

2. Calculate the effective dielectric constant

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

where ϵ_{eff} is the effective dielectric constant; h is the substrate thickness; w is the patch width.

3. Calculate the effective length

$$l_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}.$$

4. Calculate the extension length

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)}.$$

5. Calculate the patch length $L_p = l_{eff} - 2\Delta L$.

Antenna and substrate specifications

The dimensions of the patch antenna play an essential role to make the antenna design effective in terms of desired results. The parameters of the antenna are presented in Tab. 1.

Table 1. Antenna design parameters

Parameter	Symbol	Parameter value	
		Rogers RT/Duroid 5880	FR-4
Operating frequency	f_0	2.5 GHz	2.5 GHz
Patch dimension along x	L_p	38.857 mm	28.04 mm
Patch dimension along y	L_p	52.177 mm	36.85 mm
Substrate thickness	h	1.58 mm	2.8 mm
Substrate dimension along x	L_s	80 mm	80 mm
Substrate dimension along y	W_s	80 mm	80 mm
Inset gap	G	0.8 mm	4.5 mm
Feeding line length	L_f	10 mm	20 mm
Feeding line width	W_f	2.5 mm	3 mm
Dielectric constant of substrate	ϵ_r	2.2	4.3
Input impedance	Z_0	50 Ω	50 Ω

The substrate of the antenna is made from Rogers RT/Duroid 5880 and from FR4. The materials' characteristics are listed in Tab. 2.

Table 2. Substrate parameters

Parameter	Symbol	Parameter value	
		Rogers RT/Duroid 5880	FR-4
Dielectric constant	ϵ_r	2.2	4.3
Loss tangent	σ	0.0009	0.035
Substrate thickness	h	1.58 mm	2.8 mm

Results and discussion

Fig. 2 represents the amount of power at the input port of the antenna which is reflected back and the remaining power which is radiated by the antenna. The value of return loss is less than or equal to -10 dB at a particular frequency band for the antenna to work efficiently for practical applications [8].

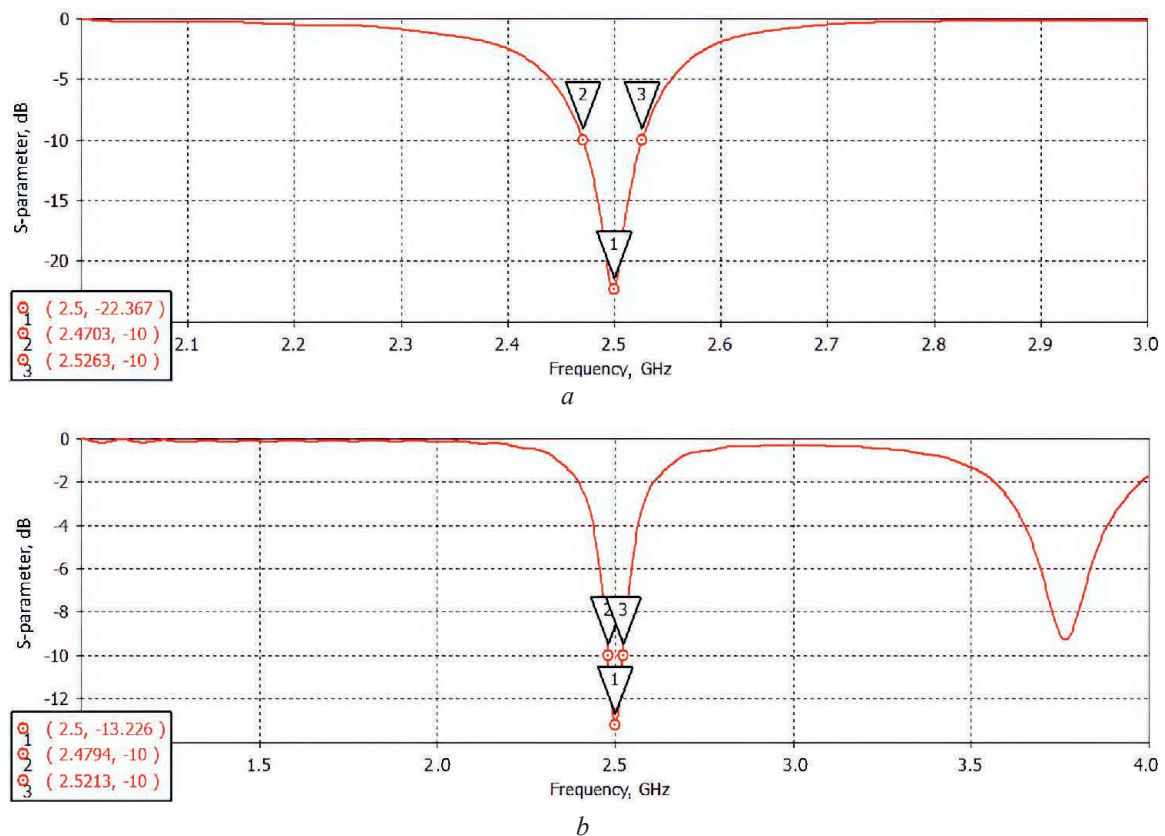


Fig. 2. RL result for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (a) and FR-4 (b) substrates

The result from Fig. 2 shows the minimum return loss value achieved at 2.5 GHz which is -22.36 dB for Rogers RT/Duroid 5880 and -13.226 dB for FR-4. The value is marked by 1, and the achieved values are acceptable. Bandwidth on the other hand is the difference between the two values of frequency marked by 2 and 3. So, the antenna's BW will be demonstrated to be 0.056 GHz for Rogers RT/Duroid 5880 and 0.0419 GHz for FR-4.

Voltage standing wave ratio (VSWR) indicates how much an antenna's impedance is fitted to the radio or transmission line to which it is linked [9]. The ideal value of VSWR is 1 where maximum power is transferred [10]. Fig. 3 shows the value of the antenna's VSWR at 2.5 GHz. The VSWR is 1.1646 marked with 1 for Rogers RT/Duroid 5880, and 1.5579 for FR-4.

The Gain denotes the amount of power transferred to the main beam [11]. It can also be defined as the ratio of output power (or amplitude) to input power (or amplitude). As can be seen in Fig. 4 the gain of the MPA at 2.5 GHz and 7.296 dBi using Rogers RT/Duroid 5880, and 5.708 dBi for FR-4. For farfield gain the next figures show the polar pattern for the MPA's gain.

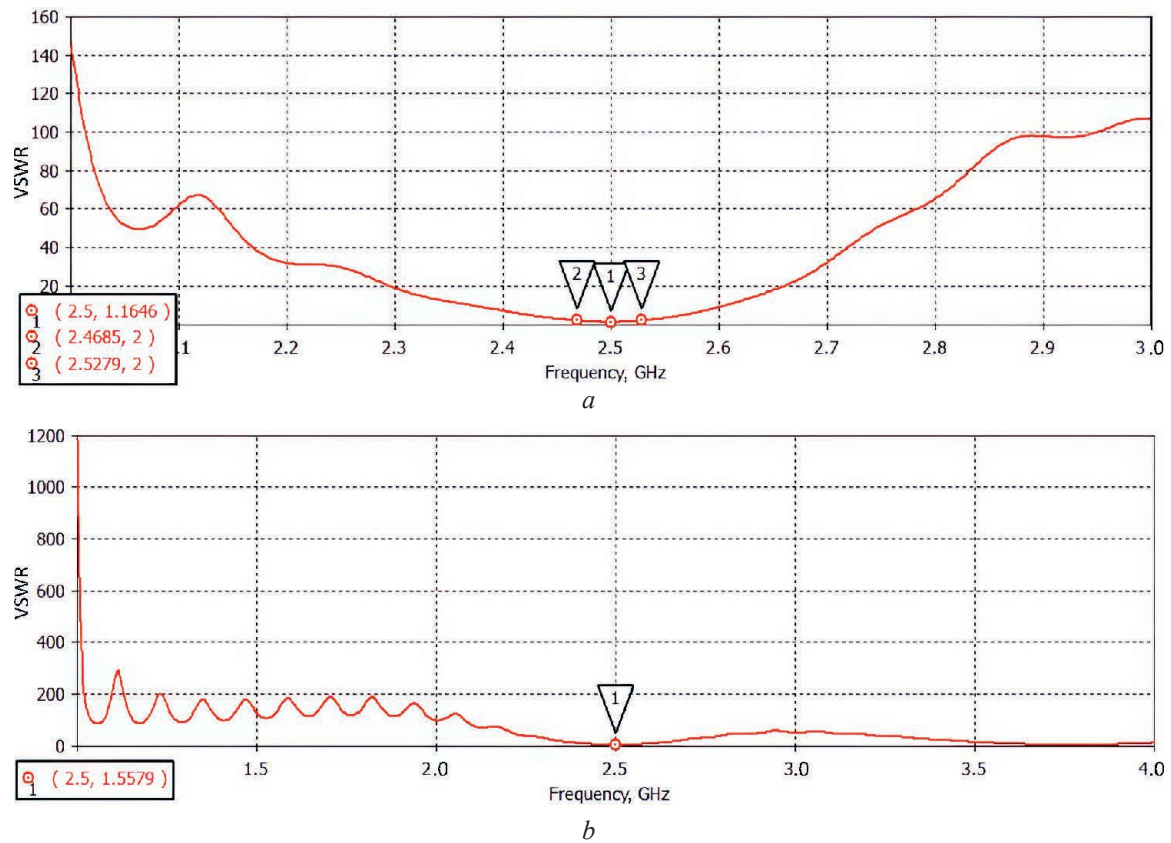


Fig. 3. Voltage standing wave ratio result for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (a) and FR-4 (b) substrates

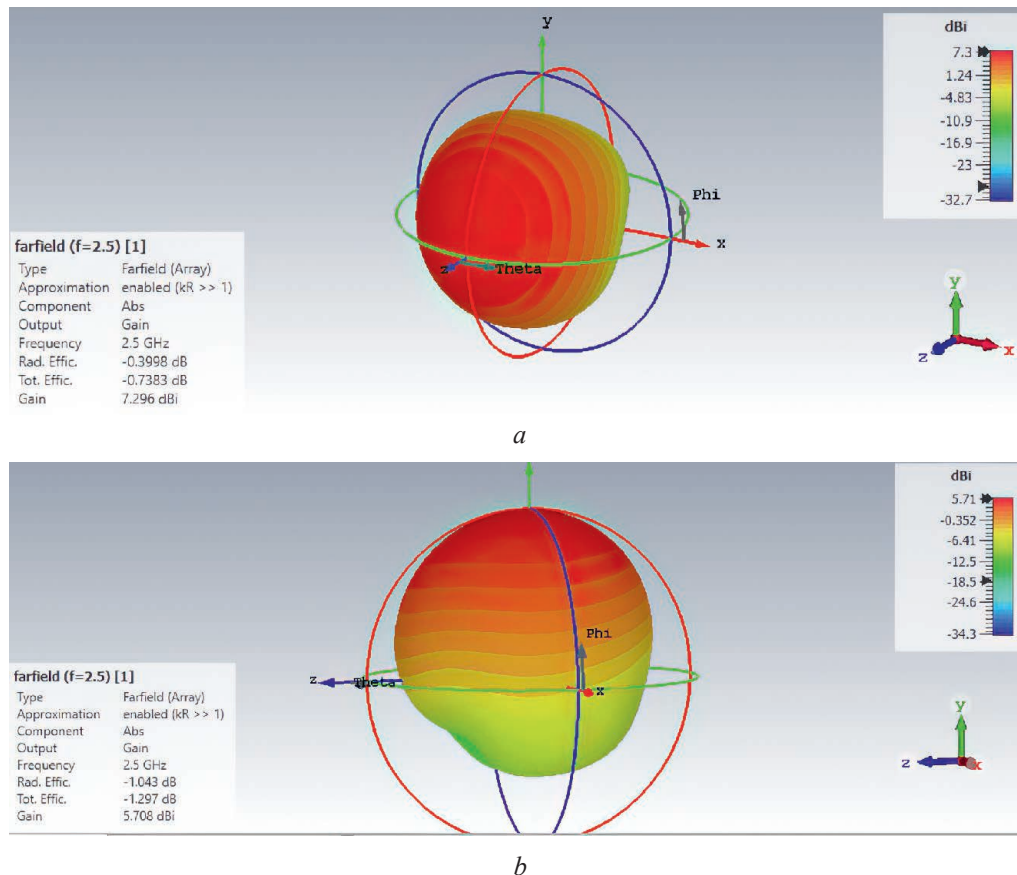


Fig. 4. Gain result for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (a) and FR-4 (b) substrates

Polar gains pattern result for the antenna are presented on Fig. 5.

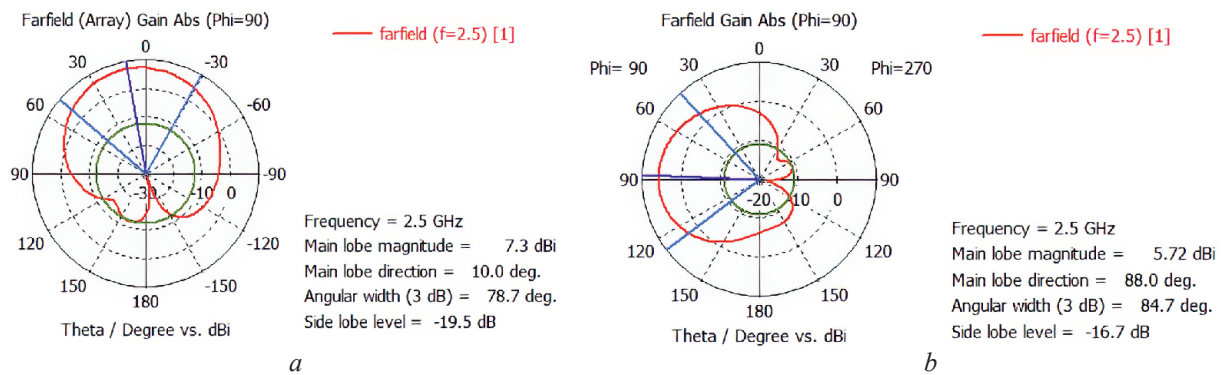


Fig. 5. Polar gain pattern result for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (a) and FR-4 (b) substrates

The primary lobe of the Rogers RT/Duroid 5880 has an intensity of 7.3 dBi, and main lobe direction is 10.0 degrees. The angle that corresponds to a value of 3 dB is 78.8 degrees. This antenna has a side-lobe level of -19.5 dB on the sidelobe scale. Fig. 5, b shows a magnitude of 5.72 dBi in the main lobe and its angle is 88.0 degrees. The angle that corresponds to a value of 3 dB is 84.7 degrees, and the MPA has a side lobe level of -16.7 dB for FR-4 substrate.

The radiation pattern refers to the representation that is graphical of the distribution of radiated energy as a function of direction. Directivity, on the other hand, can measure the quantity of radioactivity for a particular path. The results of the antenna radiation patterns with Rogers RT/Duroid 5880 and FR-4 substrates are shown in Fig. 6.

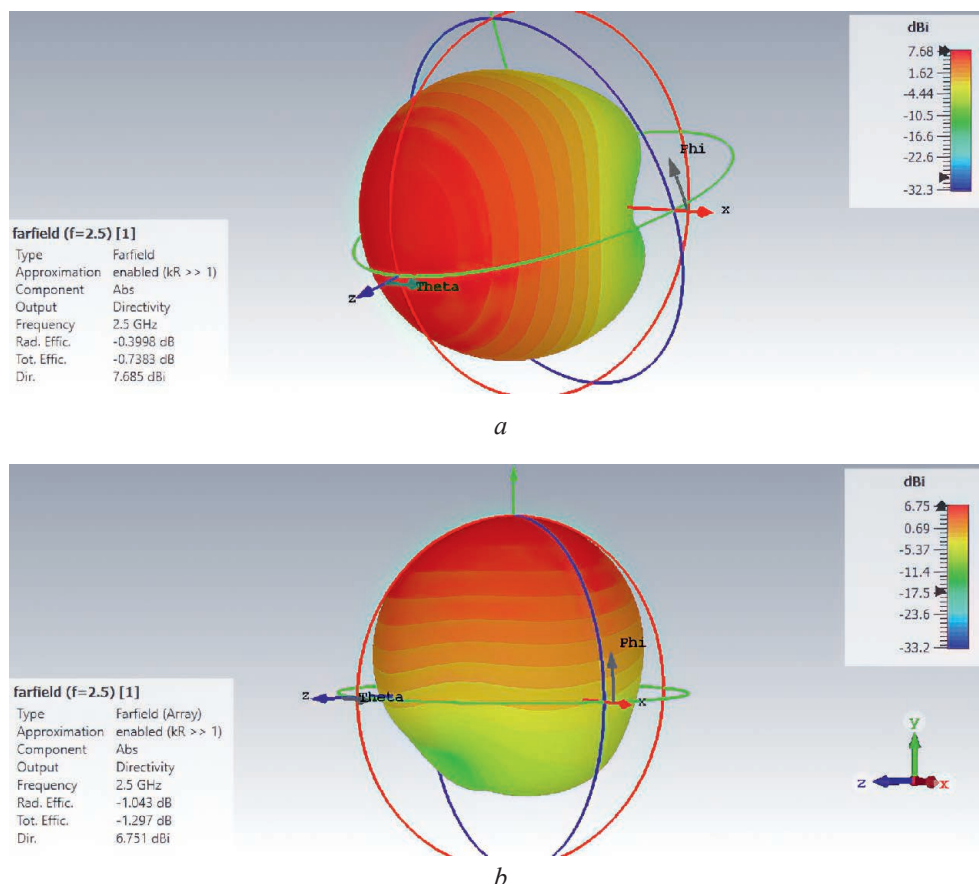


Fig. 6. Radiation patterns result for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (a) and FR-4 (b) substrates

As it can be seen from the previous figures, the given value of the radiation pattern is 7.685 dBi of the MPA using Rogers RT/Duroid 5880. When the value of FR-4 material is 6.751. Fig. 7, a shows the polar directivity for Rogers RT/Duroid 5880. The primary lobe has an intensity of 7.61 dBi

and an angle of 3.0 degrees. The 3 dB angular value was found to be 85.8 degrees. This antenna has a sidelobe level of -16.0 dB. Fig. 7, *b* shows the FR-4 polar directivity. The primary lobe has an intensity of 6.75 dBi and an angle of 88.0 degrees. The 3 dB angular value was found to be 84.8 degrees. This antenna has a sidelobe level of -16.7 dB.

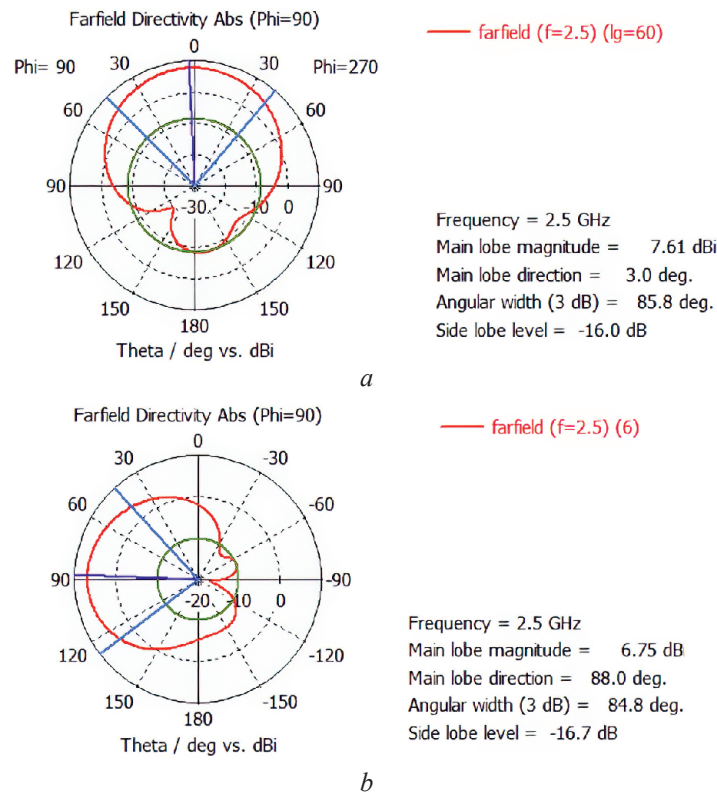


Fig. 7. Polar radiation patterns for the antenna with Rogers RT/Duroid 5880 (*a*) and FR-4 (*b*) substrates

Radiation efficiency η is basically defined as the ratio of the total power radiated by an antenna to the net power accepted by the antenna from the connected transmitter. It is given by the next equation: $\eta = G/D$. According to the previous equation radiation levels are 94.9 % for Rogers RT/Duroid 5880 and 84.55 % FR-4. At a frequency of 2.5 GHz, the proposed MPA has a best radiation efficiency of 94.9 %. Tab. 3 displays and summarizes the results of the simulation.

Table 3. Results synopsis

Parameter	Material	
	Rogers RT/Duroid 5880	FR-4
Return loss, dB	-22.36	-13.226
BW, GHz	0.056	0.0419
VSWR	1.1646	1.5579
Gain, dBi	7.296	5.708
Radiation pattern, dBi	7.685	6.751
Efficiency, %	94.9	84.55

Conclusion

1. This paper designed and analyzed a MPA for 2.5 GHz wireless body area networks (WBANs) using FR-4 and Rogers RT/Duroid 5880 substrate materials. The results showed that the choice of substrate material significantly impacts antenna performance. Rogers RT/Duroid 5880 material provided superior performance in bandwidth, radiation pattern, VSWR, gain, and efficiency, making it crucial for the development of efficient WBAN systems and enhancing communication reliability between wearable devices.

2. In summary, the study shed light on the importance of material selection in designing MPAs for WBANs, comparing FR4 and Rogers RT/Duroid 5880 substrate materials. Rogers RT/Duroid 5880 offers superior performance, enhancing communication reliability and efficiency in medical, wearable technologies, and body-centric network applications.

References

1. Hussain S., Hafeez S., Memon S., Pirzada N. (2018) Design of Wearable Patch Antenna for Wireless Body Area Networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 9 (9).
2. Balanis C. (2005) *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey, John Wiley & Sons.
3. Ding Z., Zhang D., Ma C. (2020) A Study of a Microstrip Patch Antenna with a Drilled Through-Holes Array Structure Based on the Line Source Analysis Method. *Frontiers in Physics*. 8 (2).
4. Singh I., Tripathi V. S. (2011) Micro Strip Patch Antenna and Its Applications: A Survey. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2.
5. Bansal A., Gupta R. (2017) A Review on Microstrip Patch Antenna and Feeding Techniques. *International Journal of Information Technology*.
6. Patel T., Sahoo M. (2016) Design Issues of Wearable Antennas. *IJARIIIE*. 2 (2).
7. Dumanli S. (2016) Challenges of Wearable Antenna Design. *IEEE*. London, UK. DOI: 10.1109/EuMC.2016.7824602.
8. Sharma N., Sandhu S. (2017) A Slotted Rectangular Microstrip Patch Antenna for Wideband Wireless Applications. *International Journal of Engineering and Technology*. 9 (3).
9. Jilani A. K., Hossain A., Lamia F. Y., Rahman A., Sharkar A. H., Ahsan R. (2022) Design of 2*1 Patch Array Antenna for 5G Communications Systems Using Mm-Wave Frequency Band. *IEEE, 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference*.
10. Anwar A., Islam R., Mollik D., Purnendu P. K. S., Hasan R. R. (2023) 5G MIMO Antenna in Wireless Communication with Higher Efficiency & Return Loss. *The Fourth Industrial Revolution and Beyond. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8032-9_19.
11. Islam R., Mahbub F., Akash S. B., Al-Nahian S. A. K. (2021) Design of a Half-Wave Dipole Antenna for Wi-Fi & WLAN System using ISM Band. *IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*. DOI: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422495.

Received: 18 December 2024

Accepted: 24 April 2025

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Alboun R. F., Engineer in the Electrical Engineering and Electronic Department, University of Zawia (UZ)

Albishti A., Associate Professor, Lecturer at the Electrical Engineering and Electronic Department, UZ

Ayad H., PhD, Lecturer at the Electrical Engineering and Electronics Department, UZ

Address for correspondence

16418, Libya, Az Zawiyah
University of Zawia
Tel.: + 218 91 008-95-17
E-mail: rahafboom2000@gmail.com
Alboun Rahaf Fahel



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62>

УДК 621.391.26

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ

В. М. АРТЕМЬЕВ, П. А. ХМАРСКИЙ, А. О. НАУМОВ

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Разработана методика, основанная на использовании данных системы мониторинга ионосферы и магнитосферы для снижения систематических ошибок радиолокационных измерений. Проведено сравнение экспериментальных данных мониторинга и расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2020 для двух сценариев – периода возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы. Установлено, что в периоды ионосферных возмущений расчеты IRI-2020 могут занижать систематические погрешности дальности в 1,5–2 раза, особенно для диапазонов VHF и UHF, где погрешности могут достигать 7,0–10,0 и 1,0–1,2 км соответственно при малых углах места. Показано, что погрешности радиальной скорости и угла места также существенно зависят от состояния ионосферы. Продемонстрировано, что использование оперативных данных мониторинга состояния ионосферы обеспечивает существенное повышение точности радиолокационных измерений, особенно для низкочастотных диапазонов и в периоды геофизических возмущений.

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, систематические погрешности, GPS, электронная концентрация, модель IRI-2020, трехмерная реконструкция, радиолокационная станция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают признательность специалистам Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси и его директору Г. А. Аронову за предоставленные данные мониторинга и анализа геомагнитной обстановки.

Для цитирования. Артемьев, В. М. Снижение погрешности радиолокационных измерений за счет использования данных мониторинга ионосферы и магнитосферы / В. А. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62>.

REDUCING RADAR MEASUREMENT ERRORS USING IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE MONITORING DATA

VALENTIN M. ARTEMYEV, PETR A. KHMARSKIY, ALEXANDER O. NAUMOV

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A methodology based on the use of ionospheric and magnetospheric monitoring system data to reduce systematic errors in radar measurements was developed. A comparison between experimental monitoring data and calculations was made using the international reference ionospheric model IRI-2020 for two scenarios: disturbed (September 12, 2024) and quiet (September 14, 2024) ionosphere. It was found that during periods of ionospheric disturbances, model IRI-2020 can understate systematic range errors by 1.5–2 times, especially for VHF and UHF bands, where errors may reach 7.0–10.0 and 1.0–1.2 km respectively at low elevations. It was shown that radial velocity and elevation errors also significantly depend on the ionospheric state. The use of real-time ionospheric monitoring data provides a substantial improvement in the accuracy of radar measurements, particularly for low-frequency bands and during periods of geophysical disturbances.

Keywords: ionosphere, magnetosphere, systematic errors, GPS, electron concentration, IRI-2020 model, three-dimensional reconstruction, radar.

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

Gratitude. The authors express their gratitude to the specialists of the Geophysical Monitoring Center of the National Academy of Sciences of Belarus and its director, G. A. Aronov, for providing the data for monitoring and analysis of the geomagnetic environment.

For citation. Artemyev V. M., Khmarskiy P. A., Naumov A. O. (2025) Reducing Radar Measurement Errors Using Ionosphere and Magnetosphere Monitoring Data. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62> (in Russian).

Введение

Ионосфера оказывает значимое влияние на точность радиолокационных измерений, особенно для наземных радиолокационных станций (РЛС), работающих в диапазонах VHF и UHF и предназначенных для обнаружения, сопровождения искусственных спутников, элементов космического мусора, а также мониторинга ближнего и дальнего космоса [1, 2]. Наиболее существенны возникающие систематические погрешности радиолокационных измерений при работе загоризонтных РЛС (10–40 МГц, дальность более 1000 км) и радиолокаторов с синтезированной апертурой и широкой полосой сигналов (300 МГц и более), где требования к учету параметров среды распространения радиоволн особенно высоки [3, 4]. Актуальность проблемы возрастает в связи с увеличением частоты и интенсивности ионосферных возмущений, связанных, в частности, с одиннадцатилетним пиком цикла солнечной активности [3], а также с ужесточением требований к точности радиолокационных измерений. В настоящее время для компенсации ионосферных ошибок преимущественно применяются данные математических моделей, в том числе международной справочной модели ионосферы IRI-2020 [5], которая является наиболее широко используемым и признанным эмпирическим стандартом описания земной ионосферы. Однако, несмотря на распространенность этих подходов, их точность в современных задачах остается недостаточной, особенно в периоды интенсивных геофизических возмущений и при работе в низкочастотных диапазонах [6, 7]. Для дальнейшего повышения точности применяются двухчастотные измерения, адаптивные алгоритмы, а также используются данные специализированных систем мониторинга ионосферы и магнитосферы [8, 9].

Предметом исследования являлись методы компенсации ионосферных ошибок в задачах радиолокационного измерения с применением данных мониторинга ионосферы и магнитосферы. Гипотеза состоит в том, что учет оперативной информации мониторинга позволит повысить точность радиолокационных измерений по сравнению со справочными моделями, особенно в сложных условиях. Разработана методика компенсации ионосферных погрешностей в РЛС, экспериментально подтверждена ее эффективность, проведено ее сравнение со справочной моделью ионосферы IRI-2020.

Материалы и методики

Ионосфера – это ионизированная часть верхней атмосферы, существенно влияющая на распространение радиоволн: изменяются их траектория, скорость, поляризация и амплитуда, возникают сцинтилляции сигнала. Степень этого влияния определяется частотой радиоволн, временем суток, сезоном, уровнем солнечной активности и геомагнитной обстановкой. Структурно ионосфера состоит из слоев D , E , $F1$ и $F2$, различающихся по высоте и электронной концентрации; днем все слои выражены отчетливо, ночью остается в основном объединенный слой F с максимальной концентрацией электронов в $F2$ (до 10^{12} эл/м³ в средних широтах). Основным физический механизм влияния ионосферы на распространение радиоволн связан с зависимостью коэффициента преломления от концентрации свободных электронов [10, 11]

$$n = \sqrt{1 - 80,8 N_e / f^2},$$

где N_e – концентрация электронов, эл/м³; f – частота электромагнитных колебаний, Гц.

При прохождении радиоволн через ионосферу наблюдаются [10, 11] рефракция (искривление траектории, зависящее от градиента электронной концентрации и частоты), групповые и фазовые задержки (определяются полным электронным содержанием вдоль трассы), частотная дисперсия (искажает закон модуляции сигналов), а также фарадеевское вращение плоскости поляризации под действием геомагнитного поля. Ионосферные неоднородности приводят к нарушению условий когерентного накопления сигналов из-за искажения (изменения) фазового спектра и временной декорреляции, а также возникновению погрешностей измерения дальности, радиальной скорости и угла места наблюдаемых объектов.

Погрешность измерения дальности обусловлена групповой задержкой сигналов в ионосфере и вычисляется согласно выражению [11]

$$\Delta r_{\text{H}} = \frac{40,308}{f^2} \int_0^{r_{\text{n}}} N_3 dr = \frac{40,308}{f^2} \text{TEC}, \quad (1)$$

где ТЕС – полное электронное содержание, определяемое как число электронов в цилиндре с площадью основания 1 м², соединяющем наблюдаемый объект с РЛС.

Кроме того, для загоризонтных РЛС погрешности измерения дальности возникают из-за неточности прогнозирования многоскачкового распространения [4], которые в статье не анализируются.

Погрешность измерения частоты Доплера $F_{\text{д}}$ вызвана отличием фазовой скорости волны в районе цели от скорости света в вакууме, а также рефракцией радиоволны, приводящей к отличию лучевой $v_{\text{л}}$ и радиальной v_r проекций вектора скорости [11]:

$$\Delta F_{\text{D}} = 2v_r 40,308 N_3 / (fc). \quad (2)$$

Погрешность угла места цели (рефракционная ошибка) определяется как разность кажущегося и истинного углов мест (рис. 1) [11]

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{H}}. \quad (3)$$

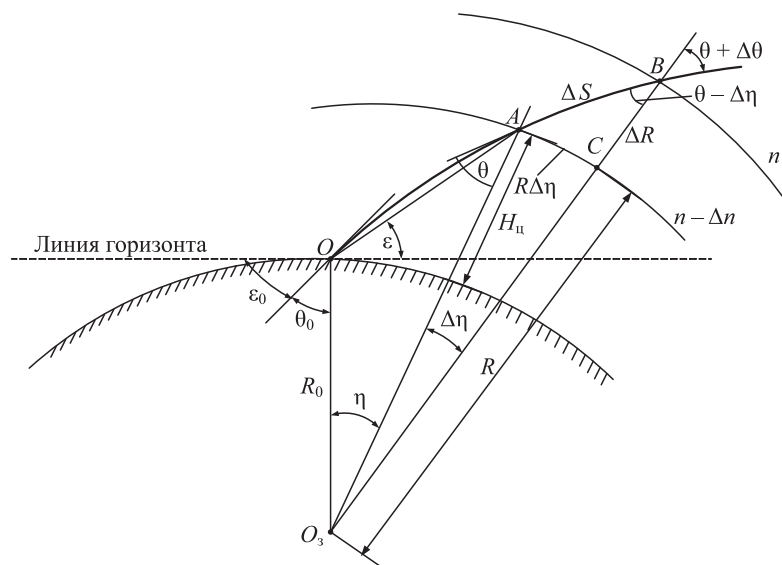


Рис. 1. К определению ошибки измерения угла места
Fig. 1. Definition of elevation measurement error

Из рис. 1 истинный угол места вычисляется как [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{н}} = \arcsin\left(\sin \eta (R_0 + H_{\text{н}}) / r_{\text{н}}\right) - \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

$$\text{где } r_{\text{и}} = \sqrt{R_0^2 + (R_0 + H_{\text{и}})^2 - 2R_0 + (R_0 + H_{\text{и}})\cos\eta}.$$

Угол η определяется по формуле [11]

$$\eta = \int_{R_0}^{R_0+H_{\text{H}}} R^{-1} \left[\left((nR)/(n_0 R_0) \right)^2 \sec^2 \varepsilon_0 - 1 \right]^{-\frac{1}{2}} dR. \quad (5)$$

Таким образом, неоднородности ионосферы вызывают флуктуации амплитуды и фазы радиосигналов, что требует оперативного контроля ионосферных и магнитосферных параметров и послужило основной причиной разработки системы мониторинга ионосферы и магнитосферы для повышения точности РЛС (рис. 2). В основе системы лежат наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и геомагнитные данные (компоненты магнитного поля

Земли). В системе реализованы следующие алгоритмы: вычисления полного (ТЕС) и вертикального (VTEC) электронного содержания [12], трехмерной реконструкции [13], обнаружения и прогноза ионосферных штормов и возмущений магнитосферы [14]. Оценка состояния ионосферы выполняется путем сравнения текущего усредненного значения VTEC с данными многолетних наблюдений согласно методике, описанной в [14]. Результатом работы системы мониторинга являются оценки характеристик ионосферы и магнитосферы (трехмерное распределение электронной концентрации, параметры и взаимосвязь ионосферных и магнитных возмущений), используемые для корректировки систематических ошибок и параметров обработки сигналов в РЛС.

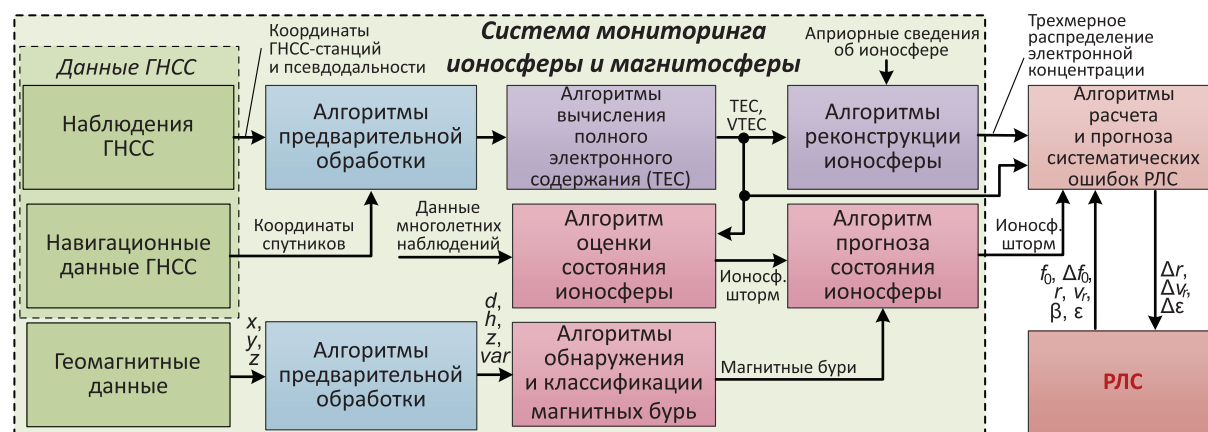


Рис. 2. Система мониторинга ионосферы и магнитосферы для повышения точности радиолокационных станций

Fig. 2. Ionosphere and magnetosphere monitoring system to improve the accuracy of radar stations

В рамках исследования разработана методика снижения погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения с использованием данных мониторинга ионосферы и магнитосферы, состоящая из шести этапов:

- 1) сбор и предварительная обработка данных от ГНСС и геомагнитных наблюдений: фильтрация и синхронизация навигационных и геофизических параметров;
- 2) вычисление ТЕС на всех трассах «спутник–приемная станция»;
- 3) оценка и прогноз состояния ионосферы и магнитосферы;
- 4) вычисление ионосферных составляющих погрешностей радиолокационных измерений с использованием данных реконструкции ионосферы (выражения (1)–(5));
- 5) используя рассчитанные по данным мониторинга и прогноза ионосферы параметры, выполняется выбор параметров обработки (допустимого времени когерентного накопления), коррекция фазовых искажений спектра широкополосных сигналов и коррекция измеряемых значений дальности, радиальной скорости и угла места путем внесения соответствующих поправок непосредственно в первичные результаты обработки радиолокационных измерений;
- 6) автоматизация учета погрешностей в вычислительном контуре РЛС и анализ эффективности, включая сравнение со стандартными моделями IRI-2020 и ГОСТ 25645.113–84.

Внедрение данной методики обеспечивает динамическую адаптацию радиолокационных систем к ионосферным возмущениям и значительно повышает точность радиолокационных измерений в условиях геофизических возмущений.

Результаты экспериментальных исследований

Для оценки эффективности методики проводился сравнительный анализ (рис. 3) на основе данных мониторинга (спутников GPS и 100 станций Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций) и расчетов по модели IRI-2020. Проанализированы следующие параметры: вертикальный профиль электронной концентрации, ТЕС и распределение VTEC над территорией Европы в результате трехмерной реконструкции ионосферы, а также систематические погрешности радиолокационных измерений дальности, радиальной скорости и угла места в различных радиочастотных диапазонах.

На рис. 3 приведена динамика ионосферно-магнитосферных возмущений в период с 10 по 15 сентября 2024 г. Результаты мониторинга ионосферы (усредненные значения VTEC, рис. 3, а)

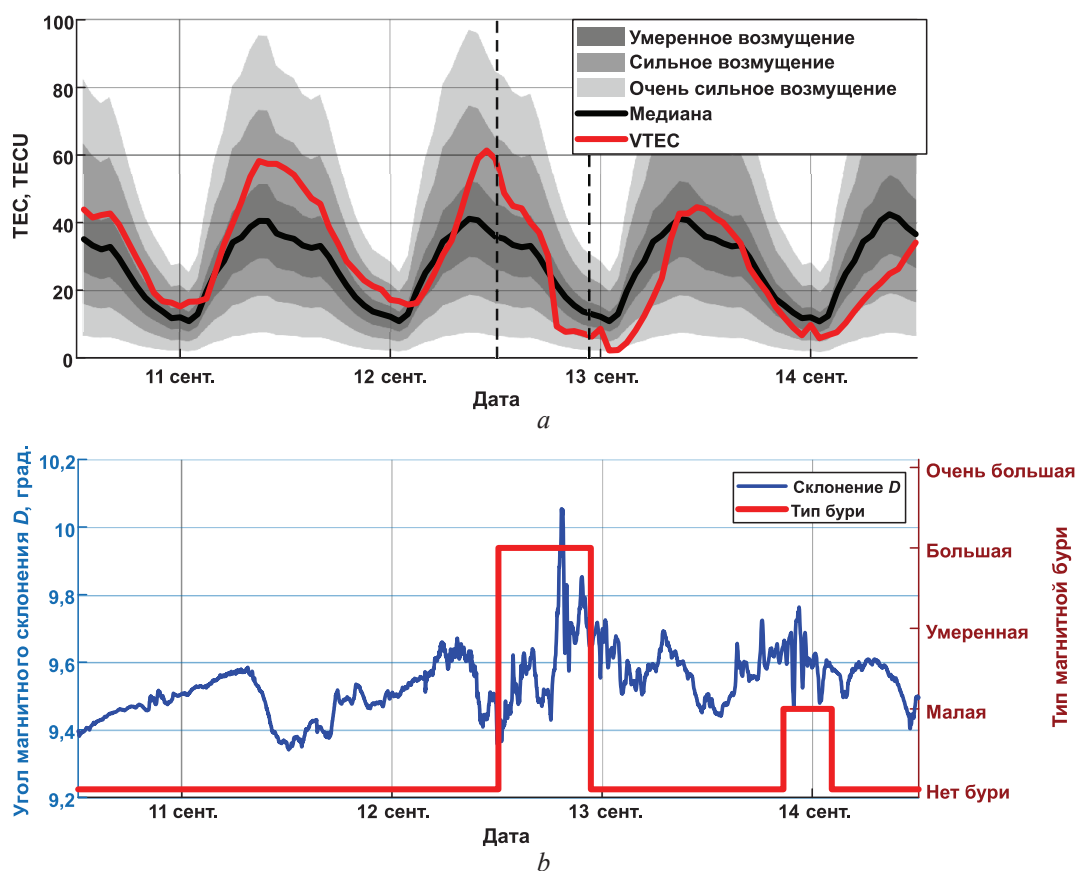


Рис. 3. Результаты мониторинга ионосферно-магнитосферных возмущений в период с 10 по 15 сентября 2024 г.: *a* – ионосферы; *b* – магнитосферы
Fig. 3. Results of monitoring ionospheric-magnetospheric disturbances in the period from September 10 to 15, 2024: *a* – ionosphere; *b* – magnetosphere

позволяют выявить периоды усиленной ионосферной активности. На рис. 3, *b* показаны изменения угла магнитного склонения и результаты обнаружения магнитных бурь. Совмещение данных мониторинга ионосферы и магнитосферы наглядно демонстрирует их взаимосвязь и возможности взаимного прогноза их возмущений.

Данные мониторинга ионосферы и модели IRI-2020 для дней с различной геофизической обстановкой – возмущенный (12 сентября 2024 г., 12⁰⁰) и спокойный (14 сентября 2024 г., 12⁰⁰) периоды – представлены на рис. 4. Для возмущенной ионосферы (рис. 4, *a*) фиксируются выраженные максимумы электронной концентрации на высотах 250–350 км и крупномасштабные неоднородности TEC, что указывает на значительные ионосферные возмущения. Модель IRI-2020 в этот период занижает значения электронной плотности по сравнению с данными мониторинга и показывает меньшую детализацию структуры. В условиях спокойной ионосферы (рис. 4, *b*) профиль ионосферных параметров становится более однородным, различия между экспериментальными и модельными данными уменьшаются. Таким образом, использование оперативных данных мониторинга ионосферы и магнитосферы позволяет точнее определять вариации электронной концентрации и полного электронного содержания, особенно в периоды возмущенной ионосферы, что важно для повышения точности радиолокационных измерений.

На рис. 5 приведен сравнительный анализ систематических погрешностей радиолокационных измерений, рассчитываемых по данным мониторинга ионосферы (сплошные линии) и по модели IRI-2020 (штриховые линии), согласно (1)–(5), для периодов возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы в диапазонах VHF, UHF, *L*, *S*, *C* и *X*. При расчете систематических погрешностей дальности считалось, что наблюдаемый объект находится за пределами области максимальной электронной концентрации, а при расчете систематических погрешностей радиальной скорости и угла места – что объект движется со скоростью 600 м/с и находится в области максимальной электронной концентрации.

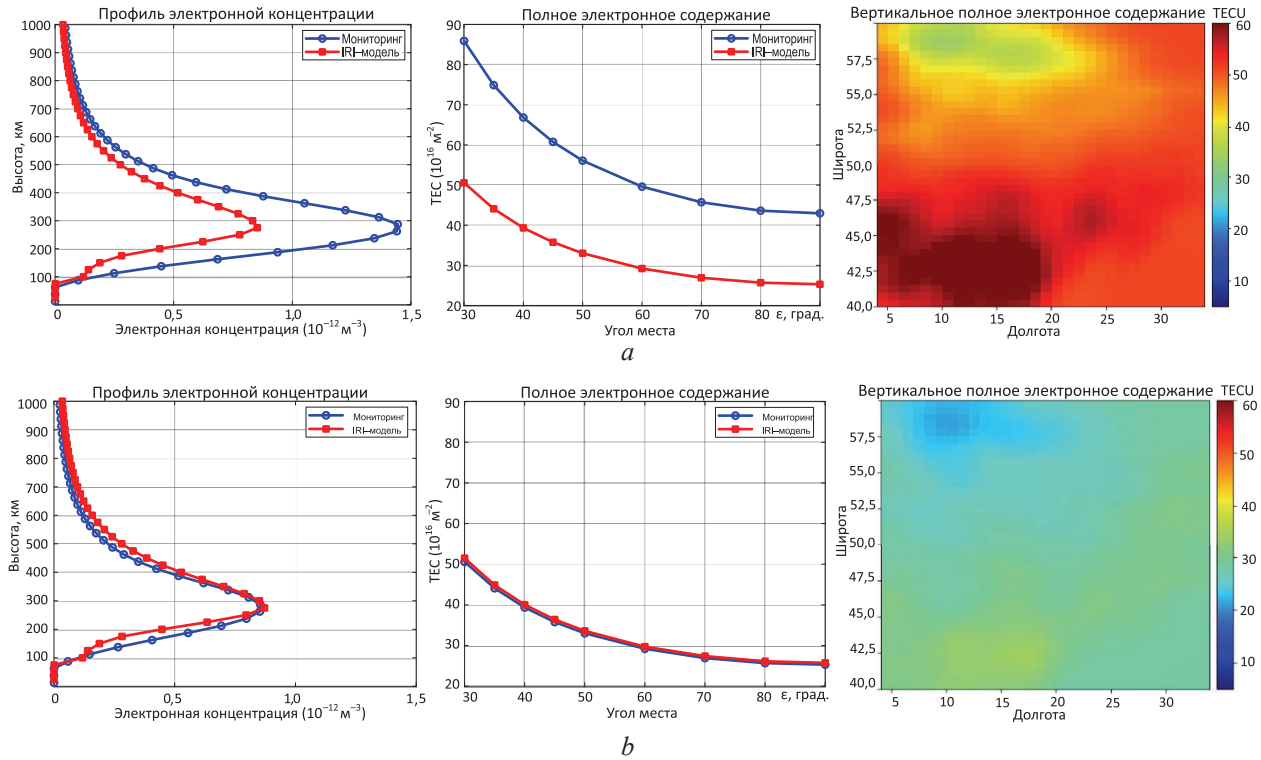


Рис. 4. Сравнительный анализ данных мониторинга и модели IRI-2020 для возмущенной (а, 12 сентября 2024 г., 12⁰⁰) и спокойной (б, 14 сентября 2024 г., 12⁰⁰) ионосферы

Fig. 4. Comparative analysis of monitoring data and the IRI-2020 model for disturbed (а, 12 September 2024, 12⁰⁰) and quiet (б, 14 September 2024, 12⁰⁰) ionosphere

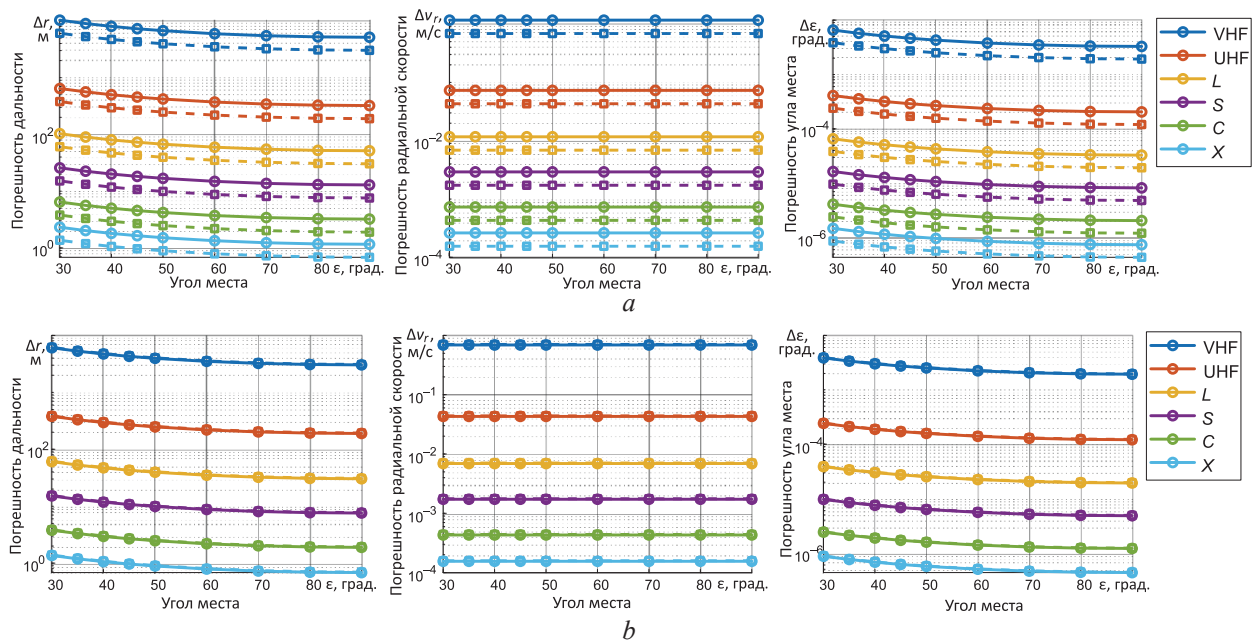


Рис. 5. Систематические погрешности радиолокационных измерений на основе данных мониторинга состояния ионосферы и модели IRI-2020 для различных диапазонов частот в период возмущенной (а) и спокойной (б) ионосферы

Fig. 5. Systematic errors of radar measurements based on ionospheric monitoring data and the IRI-2020 model for different frequency bands during disturbed (а) and quiet (б) ionospheric conditions

В условиях ионосферных возмущений (рис. 5, а) максимальные погрешности дальности в VHF-диапазоне достигают 7000–10 000 м при малых углах места, что на 30–40 % превышает значения по модели IRI-2020. В UHF-диапазоне наблюдаются погрешности до 1200 м, в L – до 200 м, в диапазонах S, C и X – не более 30, 10 и 3 м соответственно. При спокойной

ионосфере (рис. 5, *b*) различия между экспериментальными и модельными данными существенно снижаются, и для всех диапазонов погрешности согласуются с расчетами по IRI-2020. Аналогичная динамика отмечается для погрешностей радиальной скорости и угла места: наиболее значительные расхождения фиксируются в VHF/UHF-диапазонах в возмущенный период, а при спокойной ионосфере показатели мониторинга и модели практически совпадают. Наибольшие расхождения между расчетами по данным мониторинга и модели IRI-2020 проявляются в периоды ионосферных возмущений и существенно влияют на точность радиолокационных измерений в низкочастотных диапазонах и при малых углах места.

Таким образом, использование оперативных данных мониторинга состояния ионосферы обеспечивает существенное повышение точности измерений РЛС большой дальности действия, особенно для низкочастотных диапазонов и в периоды геофизических возмущений, что подтверждает необходимость применения разработанной системы мониторинга для повышения эффективности работы радиолокационных систем различного назначения.

Заключение

1. Разработана методика снижения погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения, основанная на использовании данных системы мониторинга ионосферы и магнитосферы. Такой подход предусматривает последовательную интеграцию данных глобальной сети приемников навигационных спутниковых систем и геомагнитного мониторинга, трехмерную реконструкцию электронной концентрации, автоматическую коррекцию радиолокационных параметров с учетом реальных пространственно-временных вариаций ионосферы и обеспечивает динамическую адаптацию радиолокационных систем к текущим и прогнозируемым геофизическим условиям, что позволяет существенно повысить точность радиолокационных измерений, особенно в периоды геофизических возмущений.

2. Проведено сравнительное исследование систематических погрешностей радиолокационных измерений при использовании данных мониторинга и расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2020 для двух сценариев – периода возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы. Показано, что в условиях спокойной ионосферы различия между данными мониторинга и модельными расчетами минимальны, что свидетельствует о достаточной точности модели IRI-2020 для невозмущенных условий.

3. Выявлено, что в периоды ионосферных возмущений модельные расчеты по данным IRI-2020 могут занижать систематические погрешности дальности в 1,5–2 раза. Это особенно критично для диапазонов VHF и UHF, где погрешности могут достигать 7,0–10,0 и 1,0–1,2 км соответственно при малых углах места, что обосновывает необходимость выполнять коррекцию радиолокационных измерений с учетом оперативных данных мониторинга.

4. Установлено, что при переходе к более высоким диапазонам частот (S , C , X) систематические погрешности всех типов существенно снижаются и могут быть с достаточной точностью оценены с использованием модельных расчетов даже в периоды возмущений. Выявлена зависимость всех типов погрешностей от угла места цели – наибольшие ошибки наблюдаются при малых углах, что объясняется увеличением пути сигнала через ионосферу.

5. Показано, что погрешности радиальной скорости и угла места также существенно зависят от состояния ионосферы, однако их абсолютные значения (1,0–1,5 м/с для скорости и $0,005^\circ$ – $0,008^\circ$ для угла места в VHF-диапазоне) менее критичны для большинства прикладных задач.

6. Работа выполнена в рамках программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок мало-размерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства «Комплекс-СГ» на 2023–2026 годы.

Список литературы

1. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств / В. В. Алпатов [и др.] // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 86–96. <https://doi.org/10.12737/szf-61202008>.
2. Козлов, С. И. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для задач распространения радиоволн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 6. С. 817–828. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060127>.

3. Ляхов, А. Н. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2016. I. Концентрации электронов / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Т. 59, № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010115>.
4. Фабрицио, Дж. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / Дж. А. Фабрицио. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018.
5. International Reference Ionosphere 2020 – Your Standard Model of the Ionosphere / D. Bilitza [et al.] // Earth and Space Science. 2022. Vol. 9, No 2. <https://doi.org/10.1029/2021EA002043>.
6. Беккер, С. З. Современные модели ионосферы для расчета распространения радиоволн / С. З. Беккер. М.: Радиотехника, 2018.
7. MacDonald, M. Overview of High-Power and Wideband Radar Technology Development at MIT Lincoln Laboratory / M. MacDonald, M. Abouzahra, J. Stambaugh // Remote Sens. 2024. Vol. 16, No 9. <https://doi.org/10.3390/rs16091530>.
8. Акимов, В. Ф. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / В. Ф. Акимов, Ю. К. Калинин. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017.
9. Бова, Ю. И. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме / Ю. И. Бова, А. С. Крюковский, Д. С. Лукин // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 5. С. 4–11.
10. Barton, D. K. Radar Equations for Modern Radar / D. K. Barton. Boston: Artech House, 2013.
11. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Я. Д. Ширман; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007.
12. Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data / A. O. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series. 2024. Vol. 69, No 1. P. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>.
13. Артемьев, В. М. Алгоритм и методика оптимизации его параметров для трехмерной реконструкции ионосферы / В. М. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Неразрушающий контроль и диагностика. 2024. № 1. С. 42–52.
14. Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023 / A. O. Naumov [et al.] // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2024. Vol. 27, No 3. P. 225–233. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13960570>.

Поступила 29.05.2025

Принята в печать 18.06.2025

References

1. Alpatov V. V., Bekker S. Z., Kozlov S. I., Lyakhov A. N., Yakim V. V., Yakubovskiy S. V. (2020) Analysis of Applied Ionospheric Models for Radio Wave Propagation Calculations and Possibilities of Their Use in the Interests of Radar Systems. I. Classification of Applied Models and Basic Requirements for Radar Systems. *Solar-Terrestrial Physics*. 6 (1), 86–96. <https://doi.org/10.12737/szf-61202008> (in Russian).
2. Kozlov S. I., Lyakhov A. N., Bekker S. Z. (2014) Basic Principles of Probabilistic and Statistical Ionospheric Models for Radio Wave Propagation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (6), 817–828. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060127> (in Russian).
3. Lyakhov A. N., Kozlov S. I., Bekker S. Z. (2019) Accuracy Assessment of International Ionospheric Reference Model IRI-2016. I. Electron Concentrations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 59 (1), 50–58. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010115> (in Russian).
4. Fabrizio G. A. (2018) *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. Moscow, TEKHNOFERA.
5. Bilitza D., Huang X., Reinisch B. W., Benson R. F., Hills H. K., Schar W. S. (2022) International Reference Ionosphere 2020 – Your Standard Model of the Ionosphere. *Earth and Space Science*. 9 (2). <https://doi.org/10.1029/2021EA002043>.
6. Bekker S. Z. (2018) *Modern Ionospheric Models for Calculating Radio Wave Propagation*. Moscow, Radiotekhnika (in Russian).
7. MacDonald M., Abouzahra M., Stambaugh J. (2024) Overview of High-Power and Wideband Radar Technology Development at MIT Lincoln Laboratory. *Remote Sens*. 16 (9). <https://doi.org/10.3390/rs16091530>.
8. Akimov V. F., Kalinin Yu. K. (2017) *Introduction to the Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars*. Moscow, TEKHNOFERA (in Russian).
9. Bova Yu. I., Kryukovskiy A. S., Lukin D. S. (2017) Modeling the Propagation of Frequency-Modulated Radiation in Anisotropic Ionospheric Plasma. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 22 (5), 4–11 (in Russian).
10. Barton D. K. (2013) *Radar Equations for Modern Radar*. Boston, Artech House.

11. Shirman Ya. D. (ed.) (2007) *Radioelectronic Systems. Foundations and Theory*. Moscow, Radiotekhnika (in Russian).
12. Naumov A. O., Khmarsky P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. (2024) Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 69 (1), 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>.
13. Artemyev V. M., Khmarsky P. A., Naumov A. O. (2024) Algorithm and Methodology for Optimization of Parameters for Three-Dimensional Ionosphere Reconstruction. *Nondestructive Testing and Diagnostics*. (1), 42–52 (in Russian).
14. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Aronov G. A., Kotov D. S. (2024) Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 27 (3), 225–233. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13960570>.

Received: 29 May 2025

Accepted: 18 June 2025

Вклад авторов

Артемяев В. М. обосновал концепцию исследования, сформулировал идею, цели и задачи исследования. Хмарский П. А. предложил методику снижения погрешностей радиолокационных измерений, выполнил моделирование, обобщил и интерпретировал результаты, подготовил текст рукописи.

Наумов А. О. собрал и систематизировал данные, редактировал текст рукописи, подготовил графические материалы.

Authors' contribution

Artemyev V. M. substantiated the concept of the study, formulated the idea, goals and objectives of the study. Khmarskiy P. A. proposed the methodology for reducing radar measurement errors, performed modeling, summarized and interpreted the results, and prepared the manuscript.

Naumov A. O. collected and systematized the data, redacted the manuscript, and prepared graphic materials.

Сведения об авторах

Артемяев В. М., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф, гл. науч. сотр., Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ИПФ НАН Беларуси)

Хмарский П. А., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр., ИПФ НАН Беларуси

Наумов А. О., канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. радиотомографии, ИПФ НАН Беларуси

Information about the authors

Artemyev V. M., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (IAP NAS of Belarus)

Khmarskiy P. A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher, IAP NAS of Belarus

Naumov A. O., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Laboratory of Radiotomography, IAP NAS of Belarus

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Академическая, 16
Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 17 300-73-98
E-mail: pierre2009@mail.ru
Хмарский Петр Александрович

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Akademicheskaya St., 16
Institute of Applied Physics
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 300-73-98
E-mail: pierre2009@mail.ru
Khmarskiy Petr Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69>

УДК 621.762+536.248.2

КОНТУРНЫЙ ТЕРМОСИФОН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

В. А. ОЛЕХНОВИЧ, А. Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, П. С. АНЧЕВСКИЙ

Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрен пульсирующий контурный термосифон как наиболее перспективное теплопередающее устройство для охлаждения теплонагруженных миниатюрных полупроводников, обладающее минимальными размерами испарителя и демонстрирующее плотность теплосъема более 120 Вт/см². Основной недостаток данного типа термосифонов – высокое термическое сопротивление. Для повышения эффективности теплопередачи исследованы ультратонкие порошковые капиллярные структуры, являющиеся интенсификатором процесса испарения в испарителе контурного термосифона. Показано, что применение порошковой капиллярной структуры толщиной 140 мкм, изготовленной из фракции медного порошка ПМС-Н с размерами частиц 63–100 мкм, снижает термическое сопротивление контурного термосифона в три раза и повышает плотность теплосъема до 220 Вт/см². Пульсирующий контурный термосифон может использоваться в эффективных системах охлаждения серверных станций, промышленных компьютеров, телекоммуникационного оборудования, где требуется отвод тепловыделения от миниатюрных полупроводниковых компонентов в ограниченном пространстве плотной компоновки.

Ключевые слова: охлаждение электроники, тепловая труба, контурный термосифон, порошковая капиллярная структура, испаритель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Олехнович, В. А. Контурный термосифон для эффективного охлаждения миниатюрных источников тепловыделения в электронике / В. А. Олехнович, А. Ф. Ильющенко, П. С. Анчевский // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69>.

LOOP THERMOSIPHON FOR EFFICIENT COOLING OF MINIATURE HEAT SOURCES IN ELECTRONICS

VALERY A. ALIAKHNOVICH, ALIAKSANDR PH. ILYUSHCHANKA,
PAVEL S. ANCHEUSKI

Powder Metallurgy Institute (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers a pulsating loop thermosyphon as the most promising heat-transfer device for cooling heat-loaded miniature semiconductors, which has minimal evaporator dimensions and demonstrates a heat removal density of more than 120 W/cm². The main disadvantage of this type of thermosyphons is high thermal resistance. To improve the efficiency of heat transfer, ultra-thin powder capillary structures were studied, which intensify the evaporation process in the evaporator of the loop thermosyphon. It has been shown that the use of a 140 μm thick powder capillary structure made from a fraction of copper powder PMS-N with particle sizes of 63–100 μm to reduces the thermal resistance of a loop thermosyphon by three times and increases the heat flux density to 220 W/cm². The pulsating loop thermosyphon can be used in efficient cooling systems for server stations, industrial computers, telecommunication equipment, where it is necessary to remove heat from miniature semiconductor components in a limited space of a dense arrangement.

Keywords: electronics cooling, heat pipe, loop thermosyphon, powder capillary structure, evaporator.

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

For citation. Aliakhnovich V. A., Ilyushchanka A. Ph., Ancheuski P. S. (2025) Loop Thermosiphon for Efficient Cooling of Miniature Heat Sources in Electronics. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-63-69> (in Russian).

Введение

В настоящее время широкое применение полупроводниковых компонентов, таких как центральные процессоры, графические микропроцессоры, IGBT-транзисторы, мощные светодиоды, тесно связано с проблемой охлаждения из-за значительного количества тепла, выделяемого при их работе. Согласно проведенному исследованию, установлено, что больше половины выходов из строя вычислительной техники происходит из-за перегрева [1]: когда температура полупроводникового перехода превышает 85 °С, интенсивность отказов приобретает экспоненциальный рост [2]. Поэтому для стабильной и надежной работы теплонагруженных полупроводников требуется эффективная система охлаждения, обеспечивающая отвод выделяемого теплового потока и поддержание температуры ниже критических значений.

Наблюдаемая тенденция по уменьшению геометрических размеров полупроводниковых элементов вместе с повышением их производительности ведет к увеличению плотности выделяемого теплового потока. Сегодня локальная поверхностная плотность тепловыделения компьютерных процессоров и тиристоров управления более 100 и 200 Вт/см² соответственно, а полупроводниковые лазеры могут выделять более 300 Вт/см². Проблема охлаждения миниатюрных чипов с высокой плотностью тепловыделения в современной микроэлектронной индустрии стала одним из факторов, влияющих на технологию изготовления высокоинтегральных микросхем, и в некоторой степени выступает как ограничивающий фактор по отношению к дальнейшему росту вычислительной производительности микропроцессоров следующего поколения [3].

Краткий анализ методов охлаждения

Поиск эффективных методов охлаждения теплонагруженных миниатюрных полупроводниковых элементов с размерами менее 2 см² и плотностью тепловыделения более 100 Вт/см² является важной задачей для проектирования и производства надежного современного электронного оборудования и вычислительной техники [4–6]. Распространенный и эффективный способ охлаждения электронных устройств – использование систем охлаждения на основе тепловых труб (ТТ) [7, 8]. Тепловая труба – автономное теплопередающее устройство, внутри которого организован испарительно-конденсационный принцип теплопередачи, не требующий электричества и дополнительных механизмов. Ключевым элементом ТТ является капиллярная структура (КС), которая обеспечивает транспорт теплоносителя из конденсатора в испаритель, а также играет важную роль интенсификатора процесса испарения и конденсации за счет своей развитой поверхности.

Среди классических ТТ, используемых в системах охлаждения электроники, широко применяются плоские миниатюрные ТТ [9], удобные для расположения внутри компактного современного оборудования. Однако несмотря на их высокую эффективную теплопроводность, плотность теплосъема в испарителе ограничена 25 Вт/см², что не позволяет использовать их при охлаждении более теплонагруженной электроники.

Большую эффективность теплопередачи обеспечивают контурные ТТ и термосифоны, так как имеют отдельные каналы для транспорта жидкости и пара. Высокие теплопередающие показатели демонстрируют медные контурные ТТ, работающие на воде, которые способны отводить тепловыделение плотностью до 55 Вт/см² при минимальных размерах испарителя 2×2 см² [10]. В отличие от контурных ТТ в контурных термосифонах подпитка зоны испарения осуществляется за счет сил гравитации, и при наличии КС в испарителе термосифоны могут обеспечить теплоотвод с плотностью до 80 Вт/см² [11].

Особое место среди двухфазных теплопередающих устройств занимают пульсирующие контурные термосифоны (ПКТ), которые отличаются нестационарным механизмом теплопередачи. Данный тип термосифонов характеризуется высокой плотностью теплосъема, достигающей 120 Вт/см² [12, 13], имея при этом размеры испарителя всего 1–3 см². Однако несмотря на высокую плотность теплосъема в испарителе, эффективность теплопередачи в ПКТ низкая из-за его высокого термического сопротивления, которое составляет 0,2–0,3 °С/Вт, что ограни-

чивает применение таких термосифонов в системах охлаждения электроники. Для сравнения, в классических ТТ термическое сопротивление составляет 0,05–0,07 °С/Вт.

Конструкция и принцип работы пульсирующего контурного термосифона

Пульсирующий контурный термосифон имеет простую и надежную конструкцию, представленную на рис. 1.

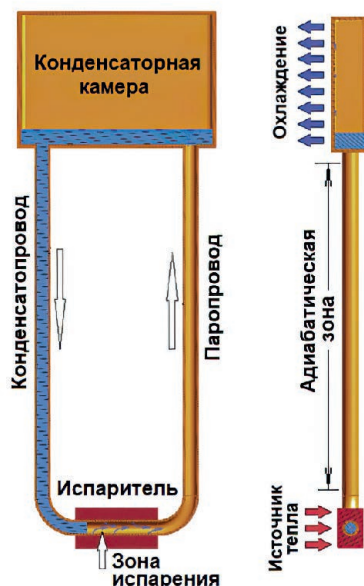


Рис. 1. Принцип теплопередачи в пульсирующем контурном термосифоне

Fig. 1. The principle of heat transfer in pulsating loop thermosyphon

ПКТ состоит из конденсаторной камеры, испарителя, паропровода и конденсатопровода. Длина испарительной части составляет всего 1–3 см. Особенность термосифона – пульсирующий механизм теплопередачи, для реализации которого необходимым условием является малый размер внутреннего канала, который ограничен условием баланса капиллярных и гравитационных сил и не должен превышать критического значения $D_{\text{крит}}$

$$D_{\text{крит}} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{жид}} - \rho_{\text{пар}})}}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{жид}}$, $\rho_{\text{пар}}$ – плотность жидкости и пара.

Условие баланса обеспечивает движение жидкости в канале в виде поршня, что препятствует проникновению пара в конденсатопровод и обеспечивает однонаправленное движение двухфазного потока в паропроводе. Величина $D_{\text{крит}}$ зависит от типа теплоносителя. Если в качестве рабочей жидкости использовать воду, то максимальный внутренний диаметр канала не должен превышать 5 мм.

Термическое сопротивление ПКТ определяется по формуле

$$R_t = \frac{T_{\text{исп}} - T_{\text{конд}}}{Q}, \quad (2)$$

где $T_{\text{исп}}$, $T_{\text{конд}}$ – средняя температура испарителя и конденсатора соответственно; Q – передаваемый тепловой поток.

Высокое термическое сопротивление ПКТ вызвано двумя основными причинами: во-первых, это нестационарность механизма теплопередачи и, во-вторых, протекание процесса испарения на гладкой поверхности канала испарителя. Поэтому очевидно, что применение развитой поверхности в виде КС в зоне испарения приведет к уменьшению термического сопротивления. В качестве КС в ТТ используются сетчатые, канавочные, волокновые и порошковые. Широкое

применение получили порошковые КС, так как имеют весомое преимущество из-за их высокого капиллярного потенциала и удельной поверхности. Интенсификация теплопередачи в ПКТ за счет применения порошковой КС в испарителе затруднена из-за малого размера канала испарителя, который составляет всего 3-4 мм, что не позволяет использовать обычные порошковые КС, применяемые в классических ТТ. Кроме того, КС должна быть достаточно тонкая, чтобы не создавать дополнительное гидравлическое сопротивление в испарителе и обеспечивать уменьшение термического сопротивления.

Ультратонкие порошковые капиллярные структуры

В Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа разработан уникальный метод получения ультратонких порошковых капиллярных структур (УПКС) с управляемыми структурными и капиллярно-пористыми характеристиками, позволяющий создавать равномерную порошковую структуру на внутренней поверхности узких каналов с условным диаметром менее 5 мм. Под ультратонкой понимается КС толщиной от одного до двух размеров частиц порошка, используемого при формировании порошкового слоя.

Суть метода заключается в формировании равномерного тонкого слоя порошка на поверхности жидкой пленки, предварительно нанесенной на внутреннюю поверхность канала испарителя. При этом жидкая пленка формируется с использованием раствора с изменяемым углом смачивания к частицам порошка, который задается определенной пропорцией компонентов раствора. Для получения УПКС применяется медный порошок марки ПМС-Н с фракциями частиц порошка от 50 до 200 мкм. ПМС-Н относится к электролитическим порошкам с частицами дендритной формы (рис. 2), который широко применяется при изготовлении КС для медных ТТ благодаря максимальной удельной поверхности получаемых структур. С помощью разработанного метода можно получать УПКС с заданными параметрами: толщина структуры – от 50 до 300 мкм, максимальный диаметр пор – 60–190 мкм, пористость – 55–75 %. УПКС могут применяться в испарителях двухфазных теплопередающих устройств с высокой плотностью теплопередачи, обеспечивая минимальное термическое сопротивление.

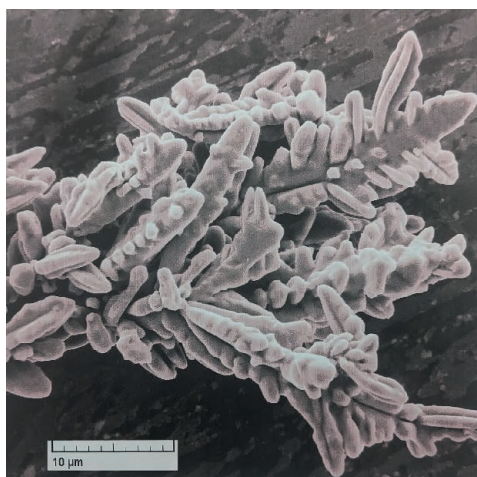


Рис. 2. Дендритная форма частиц порошка ПМС-Н
Fig. 2. Dendritic shape of PMS-N powder particles

Экспериментальное исследование пульсирующих контурных термосифонов с ультратонкими порошковыми капиллярными структурами

Проведено экспериментальное исследование зависимости теплопередающей способности ПКТ от структурных и капиллярно-транспортных характеристик УПКС, расположенной в активной зоне испарителя. Для этого был изготовлен медный образец ПКТ, показанный на рис. 3. Экспериментальный образец позволял осуществлять замену испарителя на испаритель с другими характеристиками УПКС, не меняя общей конструкции термосифона. Это дало возможность исключить влияние теплофизических факторов остальной части устройства на полученные результаты исследования. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Первая серия экспериментов была направлена на исследование зависимости термического сопротивления R_t ПКТ от размера частиц порошка при одинаковой толщине структуры. Экспериментальные испарители ПКТ с УПКС изготавливали из следующих фракций порошка ПМС-Н: 50–63, 63–100, 100–125, 125–160 и 160–200 мкм. Толщина слоя составляла (160 ± 20) мкм. Размеры испарителя: длина 18 мм, высота 10 мм, толщина 7 мм. Диаметр внутреннего канала 3 мм. На рис. 4 изображено фото УПКС, спеченной на внутренней поверхности канала испарителя.



Рис. 3. Пульсирующий контурный термосифон с ультратонкой порошковой капиллярной структурой

Fig. 3. Pulsating contour thermosiphon with ultra-fine powder capillary structure



Рис. 4. Ультратонкая порошковая капиллярная структура в канале испарителя пульсирующего контурного термосифона ($D_{\text{вн}} = 3$ мм)

Fig. 4. Ultra-fine powder capillary structure in the evaporator channel of a pulsating loop thermosiphon ($D_{\text{in}} = 3$ мм)

На рис. 5 представлены зависимости термического сопротивления R_t от размера частиц порошка. Эксперимент показал, что наименьшее термическое сопротивление при плотности теплосъема 100 Вт/см^2 зафиксировано у образца ПКТ с испарителем с УПКС, спеченной из частиц размерами 63–100 мкм, и составило $0,068 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, а минимальное значение R_t , равное $0,043 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, соответствовало пределу теплопередачи $Q_{\text{max}} = 320 \text{ Вт}$.

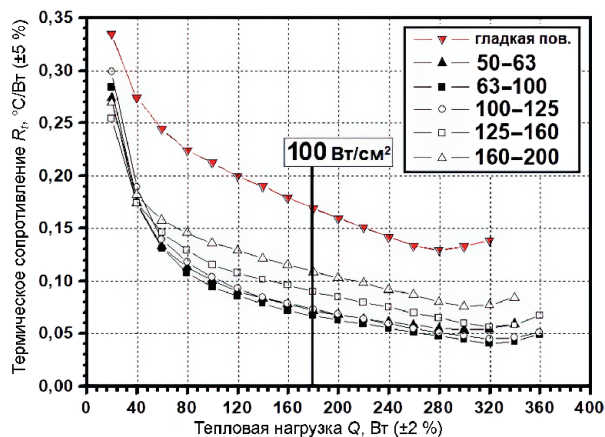


Рис. 5. Зависимость R_t от тепловой нагрузки для разных фракций порошка, мкм
Fig. 5. Dependence of thermal resistance on heat load for different powder fractions, μm

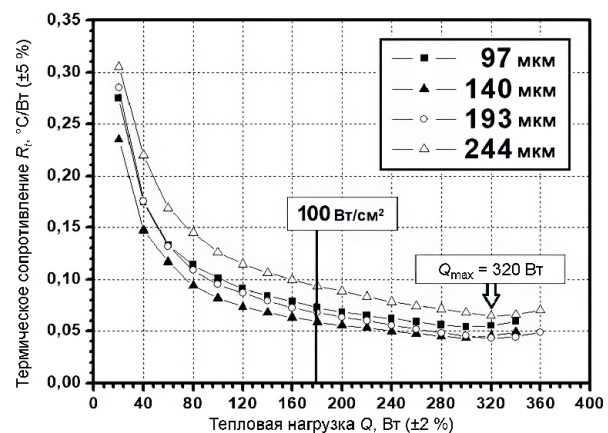


Рис. 6. Зависимость R_t от тепловой нагрузки для разной толщины ультратонкой порошковой капиллярной структуры
Fig. 6. Dependence of R_t on thermal load for different thicknesses of ultra-thin powder capillary structure

Вторая серия экспериментов была направлена на исследование зависимости термического сопротивления R_t от толщины УПКС. Для этого изготавливались испарители с толщинами УПКС 97, 140, 193 и 244 мкм (рис. 6). Для формирования КС использовалась фракция порошка 63–100 мкм как наиболее оптимальная по результатам первой серии экспериментов. На рис. 6 представлены полученные результаты в виде зависимости R_t от тепловой нагрузки для разных толщин УПКС. Эксперимент показал, что при толщине 140 мкм фиксировалось наименьшее термическое сопротивление 0,058 °C/Вт при плотности теплового потока в испарителе 100 Вт/см².

Заключение

1. Проведены исследования теплопередающей способности пульсирующего контурного термосифона с применением ультратонкой порошковой капиллярной структуры в испарителе. Получены зависимости термического сопротивления от толщины капиллярной структуры и размера частиц порошка, используемого при формировании структуры. Результаты показали, что для пульсирующего контурного термосифона с внутренним каналом 3 мм, работающего на воде, наиболее оптимальной является ультратонкая порошковая капиллярная структура толщиной 140 мкм и размерами частиц порошка 63–100 мкм. Капиллярная структура с такими характеристиками способствует уменьшению термического сопротивления всего теплопередающего устройства с 0,17 °C/Вт (для гладкого канала испарителя) до 0,058 °C/Вт при плотности теплового потока в испарителе 100 Вт/см². Минимальное R_t было зафиксировано при максимальной теплопередаче $Q_{\max} = 320$ Вт и составило 0,043 °C/Вт.

2. Применение ультратонкой порошковой капиллярной структуры в испарителе пульсирующего контурного термосифона позволило значительно уменьшить его термическое сопротивление, то есть получено эффективное теплопередающее устройство с размерами испарителя менее 2 см² и плотностью теплосъема до 220 Вт/см².

3. Пульсирующий контурный термосифон может использоваться в эффективных системах охлаждения серверных станций, промышленных компьютеров, телекоммуникационного оборудования, где требуется отвод тепловыделения от миниатюрных полупроводниковых компонентов в ограниченном пространстве плотной компоновки.

Список литературы

1. Janicki, M. Modelling Electronic Circuit Radiation Cooling Using Analytical Thermal Model / M. Janicki, A. Napieralski // *Microelectronics Journal*. 2000. Vol. 31, Iss. 9–10. P. 781–785.
2. Pokorni, S. Reliability Prediction of Electronic Equipment: Problems and Experience / S. Pokorni // *Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Belgrade, Serbia*, 6–7 Oct. 2016.
3. The International Roadmap for Semiconductors. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023.
4. Sohail Murshed, S. M. A Critical Review of Traditional and Emerging Techniques and Fluids for Electronics Cooling / S. M. Sohail Murshed, C. A. Nieto de Castro // *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 78, Iss. 1. P. 821–833.
5. Khudaiwala, A. Recent Developments in Thermal Management of Light-Emitting Diodes (LEDs) / A. Khudaiwala, R. L. Patel, R. Bumataria // *Journal of Thermal Engineering*. 2024. Vol. 10, Iss. 2. P. 517–540.
6. Zhihao, Zhang. A Review of the State-of-the-Art in Electronic Cooling / Zhihao Zhang, Xuehui Wang, Yuying Yan // *J. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2021. Vol. 1. P. 100–109.
7. Faghri, A. Heat Pipe Science and Technology / A. Faghri // Washington: Taylor & Francis DC, 1995. 1st ed.
8. Faghri, A. Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology / A. Faghri // *Journal of Heat Transfer*. 2012. Vol. 134, Iss. 12.
9. Антигравитационные тепловые трубы с многосекционными порошковыми структурами / В. В. Мазюк [и др.] // *Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: сб. докл. 7-го Междунар. науч.-техн. симп., г. Раков, 19–20 окт. 2023. С. 274–280.*
10. Maydanik, Y. High-Capacity Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Efficient Cooling Systems / Y. Maydanik, M. Chernysheva, S. Vershinin // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2020. Vol. 34, Iss. 5. P. 1–11.
11. Khrustalev, D. Loop Thermosyphons for Cooling of Electronics / D. Khrustalev // *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. 2002. P. 145–150.
12. Олехнович, В. А. Теплопередающее устройство для охлаждения микроэлектроники / В. А. Олехнович, С. В. Конев // *Тезисы докл. VI Минского Междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск: ИТМО Нац. акад. наук Беларуси, 2008. Т. 2.*

13. Олехнович, В. А. Теплопередающее устройство / В. А. Олехнович, С. В. Конев // Тепло- и массоперенос – 2008: сб. науч. тр. Минск: ИТМО Нац. акад. наук Беларуси, 2008.

Поступила 26.06.2025

Принята в печать 17.07.2025

References

1. Janicki M., Napieralski A. (2000) Modelling Electronic Circuit Radiation Cooling Using Analytical Thermal Model. *Microelectronics Journal*. 31 (9–10), 781–785.
2. Pokorni S. (2016) Reliability Prediction of Electronic Equipment: Problems and Experience. *Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Belgrade, Serbia, 6–7 Oct.*
3. *The International Roadmap for Semiconductors (ITRS)* (2023). USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
4. Soheli Murshed S. M., Nieto de Castro C. A. (2017) A Critical Review of Traditional and Emerging Techniques and Fluids for Electronics Cooling. *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78 (1), 821–833.
5. Khudaiwala A., Patel R. L., Bumataria R. (2024) Recent Developments in Thermal Management of Light-Emitting Diodes (LEDs). *Journal of Thermal Engineering*. 10 (2), 517–540.
6. Zhihao Zhang, Xuehui Wang, Yuying Yan (2021) A Review of the State-of-the-Art in Electronic Cooling. *J. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 1, 100–109.
7. Faghri A. (1995) *Heat Pipe Science and Technology*. Washington, Taylor & Francis DC.
8. Faghri A. (2012) Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology. *Journal of Heat Transfer*. 134 (12).
9. Maziuk V. V., Ilyushchanka A. Ph., Aliakhnovich V. A., Ancheuski P. S. (2023) Antigravity Heat Pipe with Multi-Section Powder Wick. *Porous Permeable Materials: Technologies and Products Based on Them, Proc. of the 7th International Scientific and Technical Symposium, Rakov, 19–20 Oct.* 274–280 (in Russian).
10. Maydanik Y., Chernysheva M., Vershinin S. (2020) High-Capacity Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Efficient Cooling Systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 34 (5), 1–11.
11. Khrustalev D. (2002) Loop Thermosyphons for Cooling of Electronics. *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. 145–150.
12. Aliakhnovich V. A., Konev S. V. (2008) Heat Transfer Device for Microelectronics Cooling. *Proc. of the VI Minsk Int. Forum on Heat and Mass Transfer*. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus. Vol. 2 (in Russian).
13. Aliakhnovich V. A., Konev S. V. (2008) Heat Transfer Device. *Heat and Mass Transfer – 2008, Collection of Scientific Papers*. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (in Russian).

Received: 26 June 2025

Accepted: 17 July 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Олехнович В. А., ст. науч. сотр. науч.-иссл. лаб. капил.-порис. матер. (НИЛ-24), Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПМ)

Ильющенко А. Ф., акад. Нац. акад. наук Беларуси, д-р техн. наук, проф., дир., ИПМ

Анчевский П. С., зав. НИЛ-24, ИПМ

Адрес для корреспонденции

220005, Республика Беларусь,
Минск, ул. Платонова, 41
Институт порошковой металлургии
имени академика О. В. Романа
Тел.: +375 17 290-99-92
E-mail: nil24@pminstitute.by
Олехнович Валерий Адамович

Information about the authors

Aliakhnovich V. A., Senior Researcher at the R&D Laboratory of Capillary-Porous Materials (Lab. 24), Powder Metallurgy Institute (PMI)

Ilyushchanka A. Ph., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director, PMI

Ancheuski P. S., Head of the Lab. 24, PMI

Address for correspondence

220005, Republic of Belarus,
Minsk, Platonova St., 41
Powder Metallurgy
Institute
Tel.: +375 17 290-99-92
E-mail: nil24@pminstitute.by
Aliakhnovich Valery Adamovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76>

УДК 621.385

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ТИПОВ ВОЛН В РЕЗОНАТОРЕ С АЗИМУТАЛЬНО-ПРОДОЛЬНО НЕРЕГУЛЯРНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В. В. МАТВЕЕНКО¹, И. П. МАТВЕЕНКО²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Современное использование вакуумных СВЧ-резонаторов охватывает множество областей науки, техники и промышленности. Эти устройства благодаря своей способности эффективно генерировать, усиливать и фильтровать СВЧ-сигналы находят применение во многих научных направлениях. Исследованы резонаторы сложной формы, которые позволяют получить улучшенные электродинамические характеристики взаимодействия с электронным потоком. Приведен расчет мод H_{mnp} и E_{mnp} в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением. Полученные решения основаны на проекционных методах при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite.

Ключевые слова: резонаторы на модах H_{mnp} и E_{mnp} , азимутально-продольно нерегулярный профиль, СВЧ-резонаторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Матвеенко, В. В. Расчет электрических и магнитных типов волн в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 70–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76>.

CALCULATING ELECTRIC AND MAGNETIC WAVE TYPES IN A CAVITY WITH AZIMUTHAL-LONGITUDINALLY IRREGULAR SECTION

VLADIMIR V. MATVEYENKA¹, IRINA P. MATVEYENKA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern use of vacuum microwave resonators covers many areas of science, technology and industry. These devices, due to their ability to effectively generate, amplify and filter microwave signals, are used in many scientific fields. Resonators of complex shape, which allow obtaining improved electrodynamic characteristics of interaction with an electron flow, are investigated. The calculation of the H_{mnp} and E_{mnp} modes in a resonator with an azimuthally-longitudinally irregular cross-section is presented. The obtained solutions are based on projection methods during verification with an electrodynamic solution in the certified international CST Studio Suite package.

Keywords: cavity at H_{mnp} and E_{mnp} mode frequencies, azimuthal-longitudinally irregular section, microwave cavities.

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

For citation. Matveyenka V. V., Matveyenka I. P. (2025) Calculating Electric and Magnetic Wave Types in a Cavity with Azimuthal-Longitudinally Irregular Section // *Doklady BGUIR*. 23 (4), 70–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76> (in Russian).

Введение

Экспериментальные исследования вакуумных СВЧ-приборов достаточно затратные, это приводит к необходимости предварительно использовать соответствующие математические модели. Полученные компьютерные результаты обеспечивают на этапе эксперимента оптимальные варианты конструкции устройства и помогают значительно сократить время его создания. Существующие программы имеют вычислительные модули, предназначенные для решения подобных задач, но решают трехмерные задачи достаточно медленно, причем только для электромагнитных мод низкого порядка, так как не совсем корректные граничные условия на концах геометрии устройств приводят к паразитным решениям. Современное развитие вакуумной электроники СВЧ на одно из первых мест выдвигает задачи получения строгих математических моделей процессов взаимодействия электронных потоков с высокочастотными полями в электронных приборах различных типов, разработки эффективных методов и алгоритмов, создания пакетов программ, составляющих базу для проектирования новейших электронных приборов СВЧ, отбора на основе компьютерного моделирования эффективных по КПД схем и получения рекомендаций по их возможностям.

Расчет полей и резонансных частот для цилиндрического резонатора

При расчете и сравнении альтернативных методов использовался один и тот же образец цилиндра в формате STL (STereoLithography), созданный программой SolidWorks 2024, который применяется для экспорта и импорта 3D-моделей в виде полигональных сеток, что необходимо для обмена данными с другими программами или 3D-печати. Расчет полей и резонансных частот для цилиндрического резонатора производился при диаметре и длине резонатора 1 см на модах H_{mnp} и E_{mnp} .

На моде H_{mnp} расчет выполняли для первых 50-ти мод резонансной частоты тремя способами: аналитически, проекционным методом, рассмотренном в [1, 2], и в среде CST Studio Suite 2025 [3]. Полученные значения резонансных частот на модах H_{mnp} на интервале 0–50 ГГц приведены в табл. 1 (где $f_{\text{CST}}, f_{\text{пр.мет}}$ – собственные частоты цилиндрического резонатора для моды H_{mnp} , полученные соответственно в среде CST Studio Suite 2025 и проекционным методом), распределения силовых линий электромагнитного поля колебаний H_{mnp} показаны на рис. 1. Значения частоты f цилиндрического резонатора для моды H_{mnp} аналитически определялись по формуле

$$f_{H_{mnp}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}, \quad (1)$$

где a – радиус трубки резонатора; l – расстояние между торцевыми стенками; μ_{mn} – корень уравнения $J'_m(\mu_{mn}) = 0$ функции Бесселя 1-го рода m -го и n -го порядков; $J'_m(x)$ – производная по аргументу; c – скорость света.

Таблица 1. Значения резонансных частот на модах H_{mnp} на интервале 0–50 ГГц
Table 1. Resonance frequency values for H_{mnp} modes in the range 0–50 GHz

Номер моды	H_{mnp}	$f_{H_{mnp}}$, ГГц	f_{CST} , ГГц	$f_{\text{пр.мет}}$, ГГц
1	H_{001}	14,99	14,99	14,99
2	H_{111}	23,10	23,11	23,11
3	H_{002}	29,98	29,98	29,98
4	H_{211}	32,77	32,80	32,82
5	H_{112}	34,75	34,76	34,76
6	H_{011}	39,52	39,56	39,58
7	H_{212}	41,81	41,83	41,85
8	H_{311}	42,80	42,84	42,87
9	H_{003}	44,97	44,98	44,98
10	H_{012}	47,28	47,32	47,34
11	H_{113}	48,28	48,29	48,30

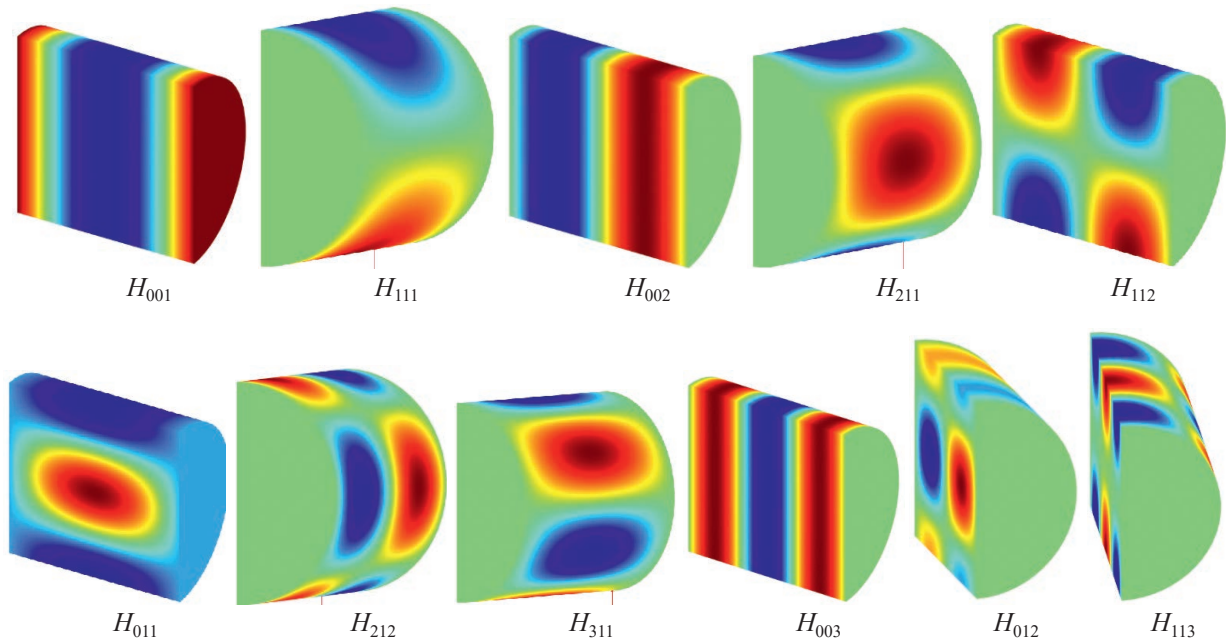


Рис. 1. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний H_{mnp}
Fig. 1. Distribution of the electromagnetic field lines of oscillations H_{mnp}

На моде E_{mnp} расчет проводился для первых 50-ти мод резонансной частоты тремя способами: аналитически, в среде CST Studio Suite 2025 и проекционным методом, рассмотренном в [1–8]. Значения частоты цилиндрического резонатора для моды E_{mnp} аналитически определялись по формуле

$$f_{E_{mnp}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{v_{mn}}{\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}, \quad (2)$$

где v_{mn} – корень уравнения $J_{mn}(v_{mn}) = 0$ функции Бесселя 1-го рода m -го и n -го порядков.

Полученные значения резонансных частот на модах E_{mnp} на интервале 0–50 ГГц приведены в табл. 2, распределения силовых линий электромагнитного поля колебаний E_{mnp} показаны на рис. 2.

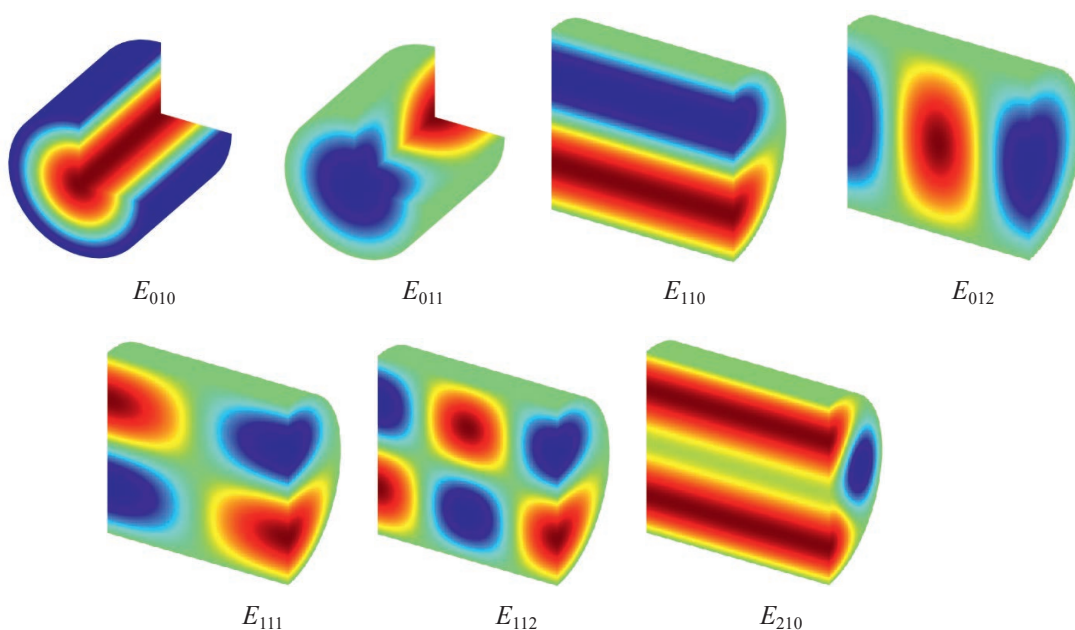


Рис. 2. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний E_{mnp}
Fig. 2. Distribution of the electromagnetic field lines of oscillations E_{mnp}

Таблица 2. Значения резонансных частот на модах E_{mnp} на интервале 0–50 ГГц
Table 2. Resonance frequency values for E_{mnp} modes in the range 0–50 GHz

Номер моды	E_{mnp}	f_{Emnp} , ГГц	f_{CST} , ГГц	$f_{пр.мет}$, ГГц
1	E_{010}	22,95	22,97	22,99
2	E_{011}	27,41	27,43	27,45
3	E_{110}	36,57	36,61	36,62
4	E_{012}	37,75	37,77	37,78
5	E_{111}	39,52	39,56	39,58
6	E_{112}	47,28	47,32	47,33
7	E_{210}	49,01	49,05	49,1

Полученные результаты полностью совпадают между аналитическими формулами (1), (2), CST Studio Suite и проекционным методом [1, 2] для всех колебаний мод H_{mnp} и E_{mnp} .

Результаты исследований полей азимутально-продольно нерегулярных резонаторов

Расчет полей и резонансных частот для азимутально-продольно нерегулярного резонатора при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм проводился следующим образом. Верификацию проекционного метода [1, 2] при помощи среды CST Studio Suite в пакете SolidWorks [4] выполняли в формате STL на азимутально-продольно нерегулярном резонаторе, изображенном на рис. 3.

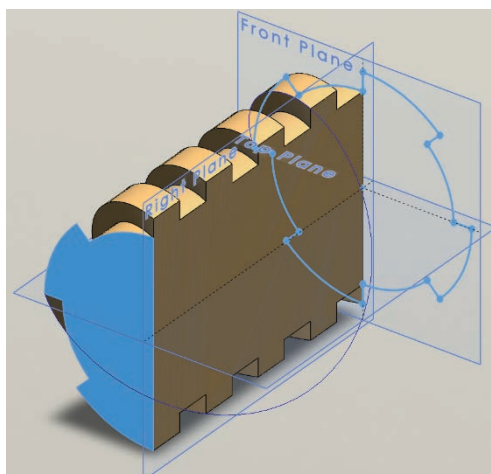


Рис. 3. Азимутально-продольно нерегулярный резонатор
Fig. 3. The cavity with azimuthal-longitudinally irregular section

Применяемый проекционный метод практически не подвержен проблеме граничных условий как CST Studio, поэтому значения колебаний моды H_{011} были получены вначале этим способом на частоте 167,25 ГГц, а затем в CST Studio на частоте 180,5 ГГц (рис. 4).

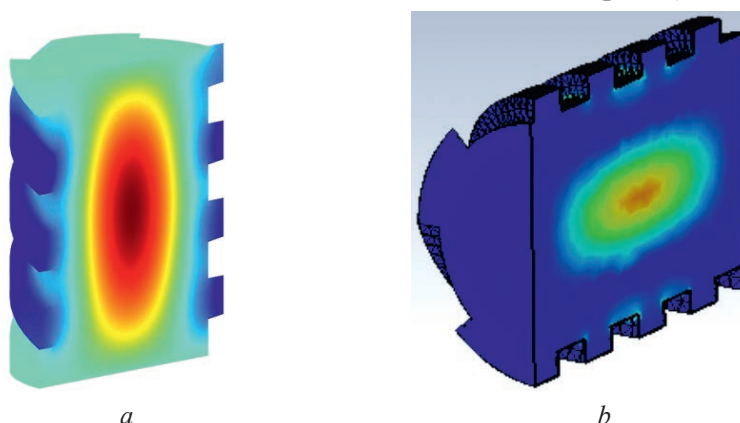


Рис. 4. Изображения колебаний моды H_{011} , полученных: *a* – проекционным методом; *b* – в пакете CST Studio
Fig. 4. Images of H_{011} mode oscillations obtained by: *a* – projection method; *b* – in the CST Studio package

Значения резонансных частот на модах H_{mnp} для азимутально-продольно нерегулярного резонатора и регулярных резонаторов при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм, полученные проекционным методом и в пакете CST Studio, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения резонансных частот на модах H_{mnp}
Table 3. Resonance frequency values for H_{mnp} modes

Номер моды	H_{mnp}	$f_{H_{mnp}}$, ГГц	$f_{пр.мет}$, ГГц
1	H_{001}	47,74	45,19
2	H_{002}	95,48	89,82
3	H_{111}	87,40–99,98	89,90
4	H_{112}	120,30–129,70	116,66
5	H_{211}	130,49–153,35	148,60
6	H_{011}	159,66–188,95	167,25

На рис. 5 изображены колебания мод E_{010} и E_{011} , полученные проекционным методом [1, 2] на частотах 112,09 и 121,77 ГГц и в пакете CST Studio на частотах 105,5185 и 114,7973 ГГц.

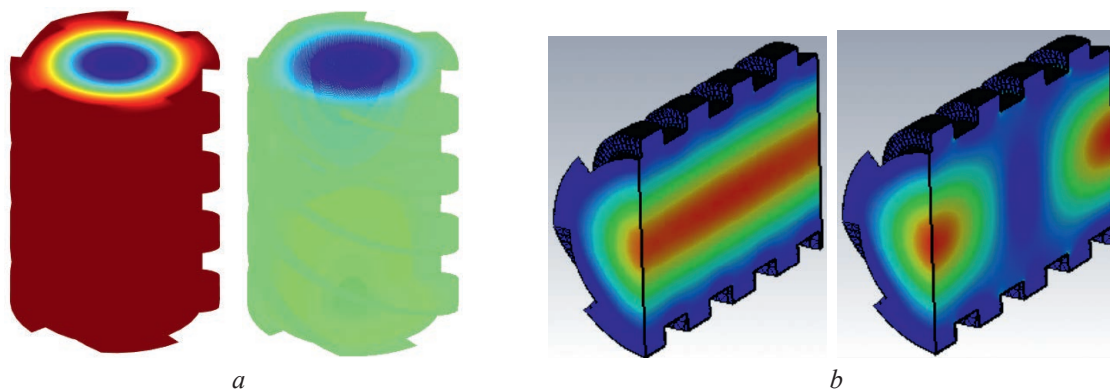


Рис. 5. Изображения колебаний мод E_{010} и E_{011} , полученных:
 a – проекционным методом; b – в пакете CST Studio

Fig. 5. Images of E_{010} and E_{011} modes oscillations obtained by: a – projection method; b – in the CST Studio package

Значения резонансных частот на модах E_{mnp} для нерегулярного резонатора и регулярных резонаторов при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм, полученные проекционным методом и при использовании пакета CST Studio, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения резонансных частот на модах E_{mnp}
Table 4. Resonance frequency values for E_{mnp} modes

Номер моды	E_{mnp}	$f_{E_{mnp}}$, ГГц	$f_{пр.мет}$, ГГц
1	E_{010}	95,62–114,74	112,1
2	E_{011}	106,90–124,30	121,8
3	E_{012}	135,10–149,30	147,1
4	E_{110}	152,40–182,80	178,4
5	E_{013}	172,20–183,50	181,7
6	E_{111}	159,66–188,95	184,6

Заключение

Показаны два способа решения электродинамических задач в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением. На основании полученных результатов можно утверждать, что новый метод достаточно надежен и удобен для создания сложных резонаторов и волноводов в различных вакуумных приборах. Проведенные исследования основаны на методах [1, 2, 5–8] при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite [3, 4, 9, 10].

Список литературы

1. Кураев, А. А. Уравнения возбуждения продольно-азимутально нерегулярных волноводов с учетом конечной проводимости стенок / А. А. Кураев, В. В. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 13–21. [http:// dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21](http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21).
2. Кураев, А. А. Клиноotron на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон / А. А. Кураев, В. В. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 2. С. 100–106. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106>.
3. CST Studio Suite [Electronic Resource] / 3D Modeling, Simulation, Social & Collaborative, and Information Intelligence Applications that Enable One to Create Virtual Twins to Visualize, Model and Simulate the Entire Environment of Sophisticated Experiences. Mode of access: https://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml. Date of access: 25.06.2025.
4. SolidWorks [Electronic Resource] / Explore Trusted 3D CAD, 2D CAD, ECAD, and Product Development Solutions Used by Leading Innovators to Design, Refine, and Deliver High-Performance Products that Meet Evolving Market Demands. Mode of access: <https://www.solidworks.com/product/all-products>. Date of access: 25.06.2025.
5. Матвеенко, В. В. Моделирование электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов с использованием пакета MATLAB / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 21–22 дек. 2022 г. Минск: Белор. гос. аграр. технич. ун–т, 2023.
6. Матвеенко, В. В. Оптимизация электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Актуальные проблемы устойчивого развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: матер. Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 7–8 июня 2023 г. С. 570–574.
7. Матвеенко, В. В. Оптимизация конструктивных параметров СВЧ-камер для сушки материалов в сельском хозяйстве / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Агропромышленный комплекс в условиях инновационного развития: наука, технологии, кадровое обеспечение: матер. II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 5–6 июня 2025 г. С. 363–366.
8. Матвеенко, В. В. Математическое моделирование электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: матер. Респ. науч.-практ. конф. «Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО–2025». С. 140–142.
9. A New Superconducting Linac for the Nuclotron–Nica Facility: Progress Report / A. A. Bakinovskaya [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. Vol. 15, No 7. P. 831–834.
10. Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron–Nica / A. V. Butenko [et al.] // IPAC 2017 – Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. P. 3282–3285.

Поступила 30.06.2025

Принята в печать 29.07.2025

References

1. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2024) Excitation Equations for Longitudinally-Azimutally Irregular Waveguides Taking into Account the Finite of the Walls Conductivity. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 13–21. [http:// dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21](http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21) (in Russian).
2. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2021) Klynotron with Using the Open Resonator And Symmetric Conical Corrugated Mirrors – Goratron. *Doklady BGUIR*. 19 (2), 100–106. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106> (in Russian).
3. *CST Studio Suite. 3D Modeling, Simulation, Social & Collaborative, and Information Intelligence Applications that Enable One to Create Virtual Twins to Visualize, Model and Simulate the Entire Environment of Sophisticated Experiences*. Available: https://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml (Accessed 25 June 2024).
4. *SolidWorks. Explore Trusted 3D CAD, 2D CAD, ECAD, and Product Development Solutions Used by Leading Innovators to Design, Refine, and Deliver High-Performance Products that Meet Evolving Market Demands*. Available: <https://www.solidworks.com/product/all-products> (Accessed 25 June 2024).
5. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2023) Modeling of Electrodynamic Processes of Microwave Drying of Materials Using the MATLAB Package. *Energy Saving – the Most Important Condition for Innovative Development of the AIC, Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 21–22*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University (in Russian).
6. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2023) Optimization of Electrodynamic Processes of Microwave Drying of Materials. *Actual Problems of Sustainable Development of Rural Areas and Personnel Provision in the Agro-Industrial Complex, Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Minsk, June 7–8*. 570–574 (in Russian).

7. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2025) Optimization of Design Parameters of Microwave Chambers for Drying Materials in Agriculture. *Agro-Industrial Complex in the Context of Innovative Development: Science, Technology, Personnel Provision, Materials of the II International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 5–6*. 363–366 (in Russian).
8. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2025) Mathematical Modeling of Electrodynamics Processes of Microwave Drying of Materials. *Agrarian Education and Science for the Agro-Industrial Complex: Materials of the Republican Scientific and Practical Conference “Belarusian Agro-Industrial Week BELAGRO-2025”*. 140–142 (in Russian).
9. Bakinovskaya A. A., Batouritski M. A., Bakhareva T. A., Butenko A. V., Gusarova M. A., Demyanov S. E., et al. (2018) A New Superconducting Linac for the Nuclotron–Nica Facility: Progress Report. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 15 (7), 831–834.
10. Butenko A. V., Emelianov N. E., Sidorin A. O., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Gusarova M. A., et al. (2017) Status of r&d on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron–Nica. *IPAC 2017 - Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference*. 3282–3285.

Received: 30 June 2025

Accepted: 29 July 2025

Вклад авторов

Матвеенко В. В. определил общую концепцию работы и основные задачи.

Матвеенко И. П. определила способ генерации и осуществила реализацию генерации мод.

Authors' contribution

Matveyenka V. V. defined the general concept of the work and the main tasks.

Matveyenka I. P. defined the generation method and implemented the generation of modes.

Сведения об авторах

Матвеенко В. В., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Матвеенко И. П., канд. техн. наук, доц., доц. каф. автоматизированных систем управления производством, Белорусский государственный аграрный технический университет

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 25 952-69-91
E-mail: vladimir66@bsuir.by
Матвеенко Владимир Владимирович

Information about the authors

Matveyenka V. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka I. P., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automated Production Control Systems, Belarusian State Agrarian Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 952-69-91
E-mail: vladimir66@bsuir.by
Matveyenka Vladimir Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-77-84>

УДК 004.896:004.852.4

АРХИТЕКТУРА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕТЕВОГО ТРАФИКА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ВИЗУАЛЬНОЙ АНАЛИТИКИ

С. ВАН¹, И. М. САЙМАНОВ², А. В. КАБУЛОВ², А. М. ПРУДНИК¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Ташкент, Республика Узбекистан)

Аннотация. Представлена архитектура прототипа системы для обнаружения аномалий сетевого трафика. Система основана на трехуровневой архитектуре с использованием веб-фреймворка Flask для создания RESTful API. Для обнаружения аномалий применяется алгоритм машинного обучения без учителя Isolation Forest (100 эстиматоров, фактор контаминации 0,05) из библиотеки scikit-learn, осуществляющий обработку данных, предварительно нормализованных с помощью StandardScaler, в одночасовых окнах. Результаты анализа, включающие многоуровневую классификацию серьезности аномалий (с нормализованными оценками в диапазоне 0–1, где значения более 0,8 соответствуют критическому уровню) и обеспечивающие совместимость с SIEM-системами, интерактивно визуализируются посредством Chart.js. Рассмотрены ключевые теоретические и практические вызовы, такие как качество данных, выбор признаков, масштабируемость (алгоритмическая сложность $O(n \log n)$), оптимизация параметров и интерпретируемость результатов.

Ключевые слова: обработка сетевого трафика, обнаружение аномалий, машинное обучение, алгоритм Isolation Forest, визуальная аналитика, архитектура системы, масштабируемость, интерпретируемость, качество данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архитектура прототипа системы обнаружения аномалий сетевого трафика на основе машинного обучения и визуальной аналитики / С. Ван [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 77–84. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-77-84>.

ARCHITECTURE OF A PROTOTYPE SYSTEM FOR NETWORK TRAFFIC ANOMALY DETECTION BASED ON MACHINE LEARNING AND VISUAL ANALYTICS

XINGYUE WANG¹, ISLAMBEK M. SAYMANOV²,
ANVAR V. KABULOV², ALEKSANDER M. PRUDNIK¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. The paper presents the architecture of a prototype system for detecting network traffic anomalies. The system is based on a three-tier architecture using the Flask web framework to create a RESTful API. Anomaly detection is implemented using the Isolation Forest unsupervised machine learning algorithm (100 estimators, contamination factor 0.05) from the scikit-learn library, which processes data pre-normalized using StandardScaler in one-hour windows. The analysis results, including a multi-level classification of anomaly severity (with normalized scores in the range of 0–1, where values greater than 0.8 correspond to the critical level) and ensuring compatibility with SIEM systems, are interactively visualized using Chart.js. Key theoretical and practical challenges, such as data quality, feature selection, scalability (algorithmic complexity $O(n \log n)$), parameter optimization, and interpretability of results, are discussed.

Keywords: network traffic processing, anomaly detection, machine learning, Isolation Forest algorithm, visual analytics, system architecture, scalability, interpretability, data quality.

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

For citation. Wang X., Saymanov I. M., Kabulov A. V., Prudnik A. M. (2025) Architecture of a Prototype System for Network Traffic Anomaly Detection Based on Machine Learning and Visual Analytics. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 77–84. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-77-84> (in Russian).

Введение

Рост объемов и сложности сетевого трафика, обусловленный увеличением числа подключенных устройств и цифровых сервисов, создает значительные вызовы для существующих систем обеспечения сетевой безопасности [1]. Современные сети обрабатывают многомерные, изменяющиеся потоки данных, что существенно усложняет задачу эффективного обнаружения аномалий [2]. Традиционные методы, основанные на сигнатурах, демонстрируют высокую эффективность при детектировании известных угроз, однако оказываются недостаточно гибкими для противодействия новым и ранее неизвестным атакам [2, 3]. Это обстоятельство подчеркивает необходимость разработки более адаптивных подходов к анализу сетевого трафика.

В данном контексте перспективным направлением является применение методов машинного обучения, способных выявлять неявные отклонения в сетевом поведении без необходимости использования наборов предварительно размеченных данных. Однако внедрение машинного обучения сопряжено с рядом технических и эксплуатационных трудностей [4]. В частности, методы неконтролируемого обучения, актуальные в условиях отсутствия размеченных выборок, могут генерировать значительное количество ложных срабатываний, а чисто алгоритмические системы часто лишены достаточной интерпретируемости для специалистов по безопасности [4, 5].

Цель исследования – разработка концептуальных и архитектурных основ системы обнаружения аномалий сетевого трафика, которая объединяет машинное обучение без учителя с интерактивными средствами визуальной аналитики. Такой гибридный подход призван решить проблемы масштабируемости и интерпретируемости, позволяя администраторам сетей не только обнаруживать, но и эффективно контекстуализировать аномалии. Предлагаемый подход фокусируется на теоретических и архитектурных аспектах, закладывая фундамент для создания надежных систем обнаружения аномалий. Ключевыми вызовами, рассматриваемыми в статье, являются выбор и оптимизация алгоритмов, предварительная обработка данных в больших масштабах, обеспечение масштабируемости для анализа в реальном времени и повышение интерпретируемости результатов.

Методика проведения эксперимента

В основе предлагаемого решения лежит модульная архитектура, нацеленная на решение задач, обозначенных во введении, и обеспечивающая масштабируемость и адаптивность системы. Система включает три основных компонента: модуль ввода и предварительной обработки данных, уровень обработки и анализа, а также модуль генерации выходных данных и управления оповещениями. Прототип системы реализован с использованием трехуровневой архитектуры, включающей уровни сбора данных, анализа и представления, с применением веб-фреймворка Flask. Компоненты взаимодействуют через RESTful API, что обеспечивает модульность и разделение задач.

Уровень сбора данных отвечает за получение сетевого трафика. Для первоначальной валидации и тестирования системы используется модуль генерации синтетических данных, включающий такие характеристики, как временные паттерны и распределение протоколов. При операционном развертывании предполагается работа с реальным трафиком, что сопряжено с проблемами качества и избыточного объема данных.

Уровень анализа включает ядро системы, где происходит обнаружение аномалий. Ключевым элементом является конвейер обработки, который выполняет извлечение признаков и применение алгоритмов машинного обучения. В прототипе этот уровень использует алгоритм Isolation Forest для детектирования аномалий, а сохраняемость данных обеспечивается SQLite и SQLAlchemy ORM.

Уровень представления отвечает за визуализацию результатов и управление оповещениями. В прототипе используется веб-интерфейс на основе Flask и Bootstrap с отрисовкой визуализаций с помощью Chart.js.

Такая архитектура (рис. 1) спроектирована для поддержки как пакетной, так и потоковой обработки данных, удовлетворяя требованиям крупномасштабного мониторинга.

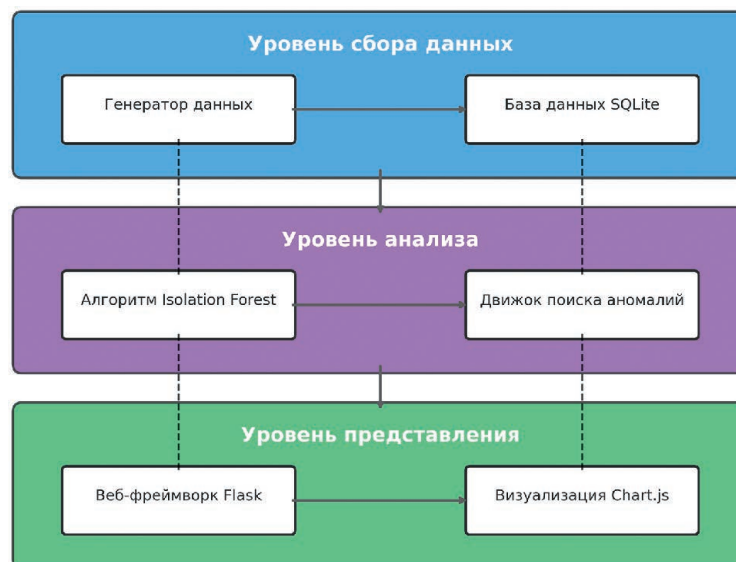


Рис. 1. Трехуровневая архитектура прототипа обнаружения сетевых аномалий

Fig. 1. Three-tier architecture of the network anomaly detection prototype

Качество входных данных является критическим фактором для эффективности системы обнаружения аномалий. В сетях данные часто гетерогенны, с неконсистентной выборкой и пропущенными значениями, что может снизить точность детектирования.

На этапе прототипирования используется модуль генерации синтетических данных, создающий записи с атрибутами, такими как временная метка, IP-адреса источника и назначения, протокол, количество переданных байт и пакетов, длительность соединения и номера портов. Этот подход соответствует практикам, описанным в [6], и позволяет моделировать различные сетевые сценарии, включая временные паттерны и распределение протоколов [7].

Для решения проблем с качеством данных и их разнородностью предлагается адаптивный конвейер предварительной обработки. Он включает нормализацию форматов данных, приведение их к единому виду с сохранением ключевых признаков. Извлечение признаков использует методы снижения размерности и z-нормализацию (z-score normalization) для унификации разнотипных метрик. В прототипе для нормализации признаков перед подачей в алгоритм Isolation Forest применяется StandardScaler из библиотеки scikit-learn, что позволяет устранить проблемы, связанные с различными масштабами признаков. Обработка данных осуществляется в одночасовых окнах, что обеспечивает баланс между эффективностью и сохранением контекста. Система спроектирована для поддержки как пакетной, так и потоковой обработки данных через гибкие интерфейсы, что важно для задач мониторинга в реальном времени [8].

Методы машинного обучения превосходят традиционные сигнатурные подходы в задачах обнаружения аномалий сетевого трафика, особенно в идентификации угроз «нулевого дня» и эволюционирующих атак. Обучение без учителя является предпочтительным ввиду отсутствия больших объемов размеченных данных в операционных сетях, где векторы атак быстро меняются. Такие методы обнаруживают аномалии как отклонения от установленной «нормы» поведения, обеспечивая масштабируемость для новых угроз.

В качестве основного алгоритма обнаружения аномалий был выбран Isolation Forest, который демонстрирует высокую эффективность при работе с многомерными данными сетевого трафика [9]. Он изолирует разреженные аномалии со средней временной сложностью $O(n \log n)$, что позволяет осуществлять обработку в реальном времени [10]. В прототипе используется реал-

лизация Isolation Forest из библиотеки scikit-learn со 100 деревьями (эстиматорами) и фактором контаминации 0,05, параметрами, оптимизированными для корпоративных сетевых сред [11]. Алгоритм вычисляет оценки аномальности на основе длин путей в случайно построенных бинарных деревьях; эти оценки затем трансформируются в диапазон [0, 1] для классификации серьезности.

Для анализа используются такие признаки, как количество переданных байт, количество пакетов, длительность соединения и номера портов. В целом в сетевом трафике может быть идентифицировано более 40 признаков [6], и оптимальный их набор может варьироваться в зависимости от типа атаки, что требует адаптивных механизмов выбора признаков.

Несмотря на преимущества, использование Isolation Forest сопряжено с вызовами. Динамический характер трафика усложняет адаптацию модели и настройку пороговых значений. Оптимизация параметров в алгоритмах изоляции может влиять на точность до 15 % [12], что усугубляется отсутствием размеченных данных. Кроме того, «непрозрачность» выходных данных (эффект «черного ящика») затрудняет интерпретацию результатов и может увеличивать время расследования инцидентов до 73 % [13]. Для решения этих проблем предлагаемый фреймворк использует гибридный подход, дополняя машинное обучение средствами визуализации, что способствует принятию решений.

Эффективность системы обнаружения аномалий во многом зависит от того, насколько понятно и оперативно результаты анализа доводятся до сведения специалистов по безопасности.

Модуль вывода использует многоуровневую систему классификации серьезности сетевых аномалий. Генерируются нормализованные оценки в диапазоне от 0 до 1, основанные на степени отклонения от базового профиля трафика. В прототипе аномалии классифицируются на критические ($>0,8$), высокие ($>0,7$), средние ($>0,6$) и низкие ($\leq 0,6$) уровни серьезности. Такой подход соответствует практикам визуализации и выводам о том, что согласованные метрики помогают в принятии решений [5]. Аномалии с оценкой более 0,8 считаются критическими и требуют приоритетного рассмотрения, что согласуется с исследованиями, показывающими, что градуированные оповещения снижают когнитивную нагрузку на аналитиков [14].

Система использует бессостоятельную (stateless) архитектуру, сохраняя результаты в формате, совместимом с системами управления информацией о безопасности и событиях (SIEM), что обеспечивает интероперабельность. При генерации оповещений применяются методы корреляции и агрегации для снижения избыточности при сохранении временных связей между событиями. Структуры данных, не зависящие от протокола, обеспечивают интеграцию с различными аналитическими платформами, сохраняя контекст угрозы.

Для улучшения интерпретируемости результатов и облегчения анализа человеком фреймворк визуальной аналитики преобразует сложные данные сетевого трафика в интерактивные визуализации с использованием Chart.js. Это позволяет администраторам контекстуализировать аномалии в операционной среде [15].

Анализ временных рядов трафика представлен линейными графиками, отображающими объем трафика за настраиваемые периоды времени (от одного часа до семи дней), что позволяет выявлять аномалии, такие как всплески, связанные с DDoS-атакам (рис. 2).

Распределение протоколов визуализируется с помощью кольцевых диаграмм, показывающих частотное распределение протоколов, что способствует быстрому обнаружению необычных паттернов, например, туннелирования или скрытых каналов. Серьезность аномалий изображается с помощью круговых диаграмм, классифицирующих обнаруженные аномалии по уровням серьезности с использованием цветовой схемы (от красного для критического до синего для низкого уровня), что позволяет быстро проводить первоначальную оценку угроз.

Как показано на рис. 2, визуализация нормальных и аномальных паттернов в пространстве признаков помогает в принятии решений. Границы принятия решений алгоритма Isolation Forest выделяют области, где аномалии отклоняются от нормального распределения трафика. Например, атаки большого объема могут кластеризоваться в верхней правой части, тогда как низкоинтенсивные атаки – в левой нижней, демонстрируя различные характеристики трафика. Оттенки фона могут представлять различные оценки аномальности, где более темные области указывают на зоны, более вероятно классифицируемые как нормальные.

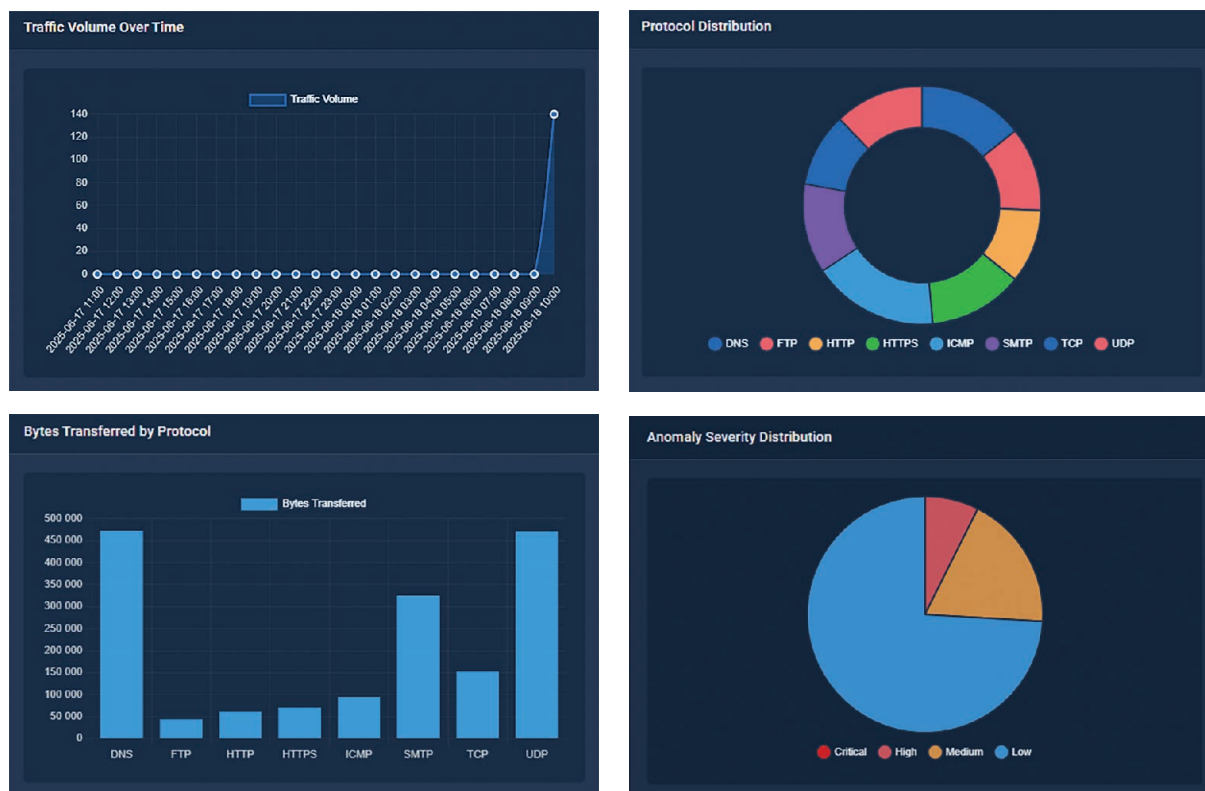


Рис. 2. Интерактивные визуализации трафика, протоколов и серьезности аномалий

Fig. 2. Interactive visualizations of traffic, protocol, and anomaly severity

Результаты исследований и их обсуждение

Представленный концептуальный фреймворк и архитектура прототипа демонстрируют жизнеспособный подход к обнаружению аномалий сетевого трафика путем интеграции машинного обучения без учителя с визуальной аналитикой. Прототип, реализованный на базе трехуровневой архитектуры с использованием Flask, SQLite и Chart.js, позволяет эффективно обрабатывать и визуализировать сетевые данные для выявления подозрительной активности.

Применение алгоритма Isolation Forest с временной сложностью $O(n \log n)$ обеспечивает теоретическую возможность обработки значительных объемов данных (до $\sim 10^5$ записей в минуту на стандартном оборудовании при обработке данных в часовых окнах), что является важным для систем, работающих в условиях интенсивного трафика. Хотя текущая реализация прототипа работает с меньшими пакетами синтетических данных, заложенная архитектура и выбор алгоритма ориентированы на масштабируемость.

Многоуровневая классификация серьезности аномалий (0–1, с порогом $>0,8$ для критических) в сочетании с интерактивными визуализациями (временные ряды, распределение протоколов, диаграммы серьезности) значительно повышает интерпретируемость результатов. Это позволяет сетевым администраторам не только идентифицировать аномалии, но и быстрее понимать их контекст, что критически важно для оперативного реагирования [15]. Визуализация нормальных и аномальных паттернов в пространстве признаков (рис. 3) помогает демистифицировать решения модели.

Несмотря на потенциальные преимущества, реализация и эксплуатация таких систем сталкиваются с рядом существенных вызовов, влияющих на точность и производительность. Гетерогенность трафика, наличие пропущенных значений и несогласованность выборок в реальных сетях остаются серьезным препятствием. Необходимы надежные механизмы предварительной обработки для нормализации данных и сохранения индикаторов аномалий.

В сетевом трафике может быть более 40 признаков [6], и оптимальный их набор варьируется в зависимости от типа атаки. Это требует разработки адаптивных механизмов выбора признаков для повышения точности обнаружения различных угроз.

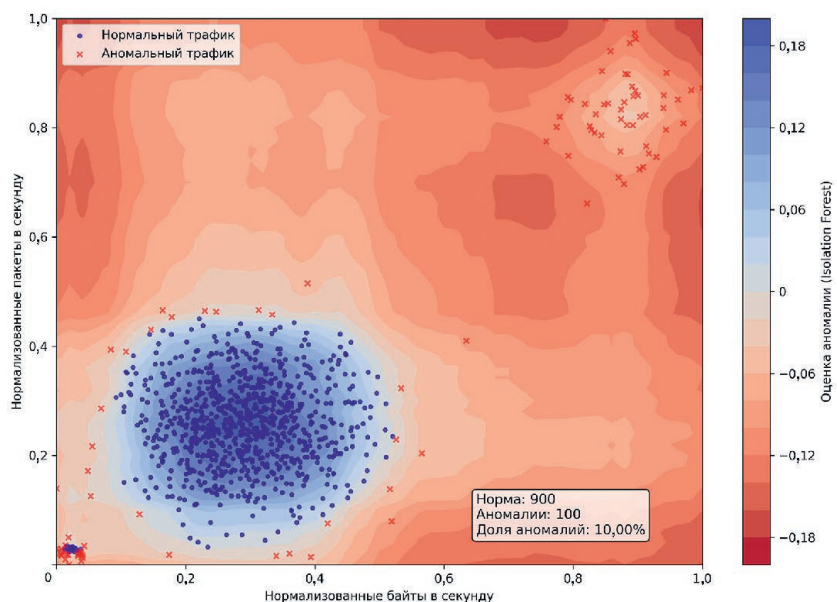


Рис. 3. Концептуальная визуализация нормальных и аномальных паттернов трафика
Fig. 3. Conceptual visualization of normal versus anomalous traffic patterns

Хотя алгоритм Isolation Forest эффективен, реальные сетевые потоки, превышающие 100 Гбит/с [16], могут создавать значительную нагрузку на ресурсы. Даже оптимизированные системы могут испытывать трудности во время пиковых нагрузок, что требует эффективных алгоритмов и стратегий управления ресурсами. Потребление памяти в текущем прототипе масштабируется линейно с объемом данных, что следует учитывать при обработке больших объемов трафика.

Настройка параметров алгоритмов, таких как Isolation Forest (например, количество деревьев, фактор контаминации), существенно влияет на точность (до 15 % [12]). Эта задача усложняется динамическим характером сетевого трафика и отсутствием размеченных данных для валидации. Для эффективной работы системы требуется механизм адаптивной настройки.

Несмотря на усилия по визуализации, модели машинного обучения, включая Isolation Forest, могут оставаться «черными ящиками». Это может увеличивать время, необходимое для расследования оповещений (до 73 % [13]), и снижать доверие к системе. Необходимы дальнейшие исследования в области объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для сетевой безопасности.

Текущий прототип имеет некоторые ограничения, такие как требование наличия минимум десяти записей для эффективного обнаружения аномалий, проблемы с отображением при высокой кардинальности данных в визуализациях и редкие ошибки конечных точек API, указывающие на необходимость улучшения механизмов обновления.

Заключение

1. Представлены теоретический фреймворк и архитектурные решения для прототипа системы обнаружения аномалий в сетевом трафике, который интегрирует машинное обучение без учителя с интерактивными средствами визуальной аналитики. Предложенный модульный подход, реализованный с использованием веб-фреймворка Flask, алгоритма Isolation Forest и библиотеки визуализации Chart.js, направлен на преодоление ограничений традиционных сигнатурных методов за счет алгоритмической адаптивности и гибкости архитектуры.

2. Система демонстрирует потенциал для эффективного выявления аномальных паттернов благодаря временной сложности $O(n \log n)$ основного алгоритма и многоуровневой системе классификации серьезности угроз. Интеграция визуальной аналитики решает одну из ключевых проблем машинного обучения – интерпретируемость результатов, предоставляя администраторам интуитивно понятные инструменты для анализа и принятия решений. Однако, как показал анализ, на пути к созданию полнофункциональных и надежных систем стоят существенные вызовы. К ним относятся обеспечение высокого качества входных данных, динамическая оптимизация

набора признаков, достижение масштабируемости для обработки высокоскоростных потоков, точная настройка параметров алгоритмов в условиях отсутствия размеченных данных и дальнейшее повышение интерпретируемости моделей. Текущий прототип также имеет ограничения, связанные с «холодным стартом», линейным масштабированием использования памяти и необходимостью улучшения стабильности API.

3. Дальнейшая работа будет сосредоточена на эмпирической валидации предложенного подхода с использованием реальных операционных данных, доработке и уточнении алгоритмов на основе метрик производительности, а также на исследовании путей решения идентифицированных проблем. Это включает разработку автоматизированных механизмов планирования анализа, повышение надежности API, внедрение обратной связи для улучшения модели и возможное использование WebGL для ускорения визуализаций.

4. Представленная разработка закладывает теоретическую и архитектурную основы для создания более совершенных систем обнаружения аномалий, способных адаптироваться к постоянно меняющемуся ландшафту сетевых угроз. Углубленное изучение обозначенных вызовов будет способствовать дальнейшему прогрессу в области применения машинного обучения без учителя для задач сетевой безопасности.

Список литературы / References

1. Sommer R., Paxson V. (2010) Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion Detection. *IEEE Symposium on Security and Privacy*. 305–316.
2. García-Teodoro P., Díaz-Verdejo J., Maciá-Fernández G., Vázquez E. (2009) Anomaly-Based Network Intrusion Detection: Techniques, Systems and Challenges. *Computers & Security*. 28 (1–2), 18–28.
3. Buczak A. L., Guven E. (2016) A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 18 (2), 1153–1176.
4. Bhuyan M. H., Bhattacharyya D. K., Kalita J. K. (2014) Network Anomaly Detection: Methods, Systems and Tools. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 16 (1), 303–336.
5. D’Amico A., Whitley K. (2008) The Real Work of Computer Network Defense Analysts. *VizSEC 2007 (Mathematics and Visualization)*. 19–37.
6. Ring M., Wunderlich S., Grödl D., Landes D., Hotho A. (2017) Flow-Based Benchmark Data Sets for Intrusion Detection. *Proc. of the 16th European Conf. on Cyber Warfare and Security*. 361–369.
7. Sharafaldin I., Lashkari A. H., Ghorbani A. A. (2018) Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization. *Proc. of the 4th International Conf. on Information Systems Security and Privacy*. 108–116.
8. Cordero C. G., Vasilomanolakis E., Milanov N., Koch C., Hausheer D., Mühlhäuser M. (2015) An Overview of the Botnet Simulation Framework. *IEEE Conf. on Communications and Network Security (CNS)*. 739–740.
9. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z. H. (2012) Isolation-Based Anomaly Detection. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. 6 (1), 1–39.
10. Ding Z., Fei M. (2013) An Anomaly Detection Approach Based on Isolation Forest Algorithm for Streaming Data Using Sliding Window. *IFAC Proceedings Volumes*. 46 (20), 12–17.
11. Apruzzese G., Colajanni M., Ferretti L., Guido A., Marchetti M. (2018) On the Effectiveness of Machine and Deep Learning for Cyber Security. *2018 10th International Conference on Cyber Conflict (CyCon)*. 371–390. IEEE.
12. Wang H., Bah M. J., Hammad M. (2019) Progress in Outlier Detection Techniques: A Survey. *IEEE Access*. 7, 107964–108000.
13. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. (2016) “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proc. of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 1135–1144.
14. Perdisci R., Ariu D., Fogla P., Giacinto G., Lee W. (2009) McPAD: A Multiple Classifier System for Accurate Payload-Based Anomaly Detection. *Computer Networks*. 53 (6), 864–881.
15. Staheli D., Yu T., Crouser R. J., Damodaran S., Nam K., O’Gwynn D., et al. (2014) Visualization Evaluation for Cyber Security: Trends and Future Directions. *VizSec ‘14: Proceedings of the Eleventh Workshop on Visualization for Cyber Security*. 49–56.
16. Perdisci R., Lee W., Feamster N. (2010) Behavioral Clustering of HTTP-Based Malware and Signature Generation Using Malicious Network Traces. *NSDI’10: Proceedings of the 7th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*. 12.

Вклад авторов

Ван С. реализовал программный прототип системы, разработал модули генерации данных и базовой визуализации.

Сайманов И. М. определил методику предварительной обработки данных, сформулировал критерии отбора признаков для анализа.

Кабулов А. В. обосновал выбор методов машинного обучения, провел экспертизу теоретических положений.

Прудник А. М. разработал архитектуру системы, определил требования к ее масштабируемости и интеграции.

Authors' contribution

Wang X. implemented the system's software prototype, developed data generation and basic visualization modules.

Saymanov I. M. defined the data preprocessing methodology, formulated feature selection criteria for analysis.

Kabulov A. V. justified the selection of machine learning methods, validated the theoretical foundations.

Prudnik A. M. designed the system architecture, defined the requirements for its scalability and integration.

Сведения об авторах

Ван С., магистрант каф. защиты информации и эргономики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Сайманов И. М., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационной безопасности, Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека (НУУ)

Кабулов А. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационной безопасности, НУУ

Прудник А. М., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инженерной психологии и эргономики, БГУИР

Information about the authors

Wang X., Master's Student at the Information Security Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Saymanov I. M., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Information Security Department, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (NUU)

Kabulov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Information Security Department, NUU

Prudnik A. M., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Engineering Psychology and Ergonomics Department, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-24
E-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Прудник Александр Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-24
E-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Prudnik Aleksander Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-85-91>

УДК 004.942, 620.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ И ФОТОТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОРГАНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

А. А. БОРИСЮК, А. В. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Проведено моделирование электродинамических и фототермических свойств сферических наночастиц серебра диаметром 31 нм с оболочкой, соответствующей оптико-электрическим параметрам янтарной кислоты, в среде фосфатно-солевого буфера. Установлено, что такие наночастицы способны усиливать электрическое поле вблизи поверхности до 37 раз. Коэффициент усиления напряженности электрического поля существенно зависит от расстояния между наночастицами и уменьшается в 10 раз при изменении расстояния от 1 до 30 нм. Показано, что увеличение толщины оболочки из сукцинат-ионов янтарной кислоты приводит к смещению резонансной длины волны наночастиц серебра в более длинноволновую область. Облучение наночастиц в режиме возбуждения локализованного поверхностного плазмонного резонанса вызывает нагрев наночастиц до 86 °С, а наличие оболочки янтарной кислоты способствует росту температуры нагрева выше 100 °С с увеличением толщины.

Ключевые слова: наночастицы серебра, стабилизирующий агент, распределение электрического поля, плазмонный резонанс, джоулев нагрев, янтарная кислота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Борисюк, А. А. Моделирование электродинамических и фототермических свойств коллоидных наночастиц серебра, стабилизированных органической оболочкой / А. А. Борисюк, А. В. Бондаренко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 85–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-85-91>.

SIMULATION OF ELECTRODYNAMIC AND PHOTOTHERMAL PROPERTIES OF COLLOIDAL SILVER NANOPARTICLES STABILIZED WITH ORGANIC SHELL

ALIAKSEI A. BARYSIUK, HANNA V. BANDARENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The electrodynamic and photothermal properties of spherical silver nanoparticles with a diameter of 31 nm and a shell corresponding to the optical-electrical parameters of succinic acid in a phosphate buffered saline medium were simulated. It was found that such nanoparticles are capable of enhancing the electric field near the surface by up to 37 times. The electric field strength enhancement coefficient significantly depends on the distance between the nanoparticles and decreases by 10 times with a change in the distance from 1 to 30 nm. It was shown that an increase in the thickness of the shell of succinate ions of succinic acid leads to a shift in the resonance wavelength of silver nanoparticles to a longer-wavelength region. Irradiation of nanoparticles in the mode of excitation of localized surface plasmon resonance causes heating of nanoparticles to 86 °C, and the presence of a succinic acid shell contributes to an increase in the heating temperature above 100 °C with increasing thickness.

Keywords: silver nanoparticles, stabilizing agent, electric field distribution, plasmon resonance, Joule heating, succinic acid.

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

For citation. Barysiuk A. A., Bandarenka H. V. (2025) Simulation of Electrodynamic and Photothermal Properties of Colloidal Silver Nanoparticles Stabilized with Organic Shell. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 85–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-85-91> (in Russian).

Введение

Структуры из благородных металлов, таких как серебро, золото и платина, демонстрируют эффект поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Уменьшение размеров объектов из таких металлов до нанометрового диапазона приводит к тому, что эффект ППР приобретает более локальный характер. Это характеризуется возникновением осцилляций электронного газа с амплитудой, соизмеримой с размерами самой наночастицы (плазмона). Таким образом образуется диполь из положительно заряженного иона металла и отрицательно заряженного электронного газа. Данный эффект называют локализованным поверхностным плазмонным резонансом (ЛППР). ЛППР нашел широкое применение в различных областях науки: в оптической спектроскопии, включая спектроскопию поверхностно-усиленного рамановского рассеяния (surface-enhanced Raman scattering, SERS) и поверхностно-усиленной флуоресценции (surface-enhanced fluorescence, SEF), фотокатализе, таргетной терапии в онкологии, в создании антибактериальных покрытий, солнечной энергетике и др. [1].

ЛППР подразумевает формирование локальных электрических полей, а также джоулев нагрев в связи с резонансным увеличением сечения поглощения. Измерение данных параметров (напряженности электрического поля и температуры поверхности наночастиц) играет ключевую роль в исследовании оптических свойств. Однако экспериментально произвести такие измерения и получить объективные данные достаточно проблематично, что обусловлено следующими факторами. В первую очередь – размерами наночастиц, поскольку для получения достоверных данных требуется выделить отдельный объект для проведения измерений, что является весьма сложной задачей [2]. Еще один лимитирующий фактор – высокая чувствительность наночастиц к изменениям окружающей среды и влиянию внешних воздействий (температура, давление, свет и др.) [3], что также затрудняет получение объективных данных. Однако наиболее значимый фактор, влияющий на измерения, особенно когда речь идет о плазмонных наночастицах, – невозможность прецизионного контроля их формы и размеров, что критично сказывается на свойствах наночастиц [3–5]. Поэтому существует потребность в предсказании оптических свойств получаемых наночастиц.

В процессе исследований проводилось математическое моделирование электродинамических и фототермических свойств синтезированных ранее коллоидных наночастиц серебра [6]. В программном комплексе COMSOL Multiphysics изучалось влияние органической оболочки на плазмонные свойства наночастиц. Оценивалась возможность применения наночастиц серебра в качестве генераторов локальных электрических полей для осуществления процесса электропорации мембран бактериальных клеток.

Постановка задачи и построение модели

Для создания модели за основу были выбраны коллоидные наночастицы серебра, которые синтезировались ранее путем модифицированного метода Туркевича [6, 7] с добавлением стабилизирующего агента в виде янтарной кислоты. При построении модели наночастиц серебра предварительно определялись их форма и размеры по изображениям, полученным на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi 4800 и обработанным в программе ImageJ. Установлено, что наночастицы имеют форму, близкую к сферической, с эффективным диаметром порядка 31 нм. На рис. 1 представлены СЭМ-изображение полученных наночастиц серебра и гистограмма распределения наночастиц по величине эффективного диаметра. Несмотря на то что форма наночастиц стремится к сферической, для каждой из них характерна определенная огранка. При этом стоит иметь в виду, что именно структура поверхности наночастиц играет наибольшее значение, когда речь идет об их электродинамических свойствах [8]. Однако для упрощения процесса построения модели форма наночастиц была принята за сферу, которая имела эффективный диаметр 31 нм.

Оригинальность выполненного исследования заключается в том, что при моделировании учитывалась органическая оболочка на поверхности наночастиц, которая состояла из сукцинат-ионов янтарной кислоты и играла роль стабилизатора.

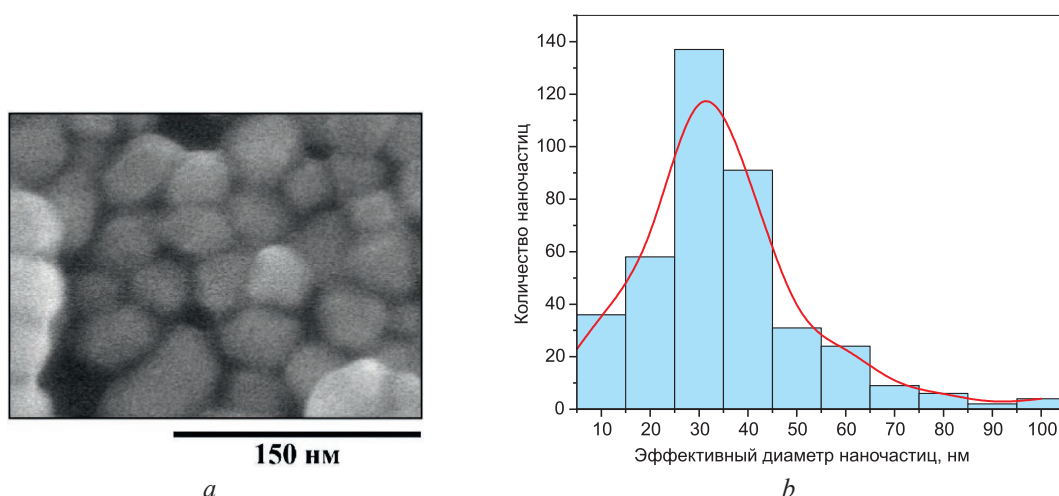


Рис. 1. СЭМ-изображение наночастиц серебра (a) и гистограмма их распределения по величине эффективного диаметра (b)
Fig. 1. SEM-images of silver nanoparticles (a) and their effective diameter distribution histogram (b)

Для изучения влияния оболочки выполнялись измерения электрических и оптических характеристик янтарной кислоты, которая применялась для создания пользовательского материала. Помимо этого, для моделирования электродинамических свойств наночастиц был добавлен пользовательский материал, характеризующийся зависимостью констант коэффициентов отражения (n и k) от длины волны излучения (данные брались из [9]).

Также при симуляции учитывалось, что наночастицы находятся в среде фосфатно-солевого буфера (ФСБ), обеспечивающего оптимальные условия для жизнедеятельности бактериальных клеток. Соответствующий материал добавлялся вручную в результате измерений требуемых для моделирования параметров. Измеренные и известные данные об электрических и оптических параметрах янтарной кислоты и ФСБ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Электрические и оптические параметры янтарной кислоты и фосфатно-солевого буфера
Table 1. Electrical and optical parameters of succinic acid and phosphate buffered saline

Параметр	Янтарная кислота	Фосфатно-солевой буфер
Коэффициент преломления	1,4002 [база данных CAS]	1,3345
Диэлектрическая проницаемость	2,4 [база данных CAS]	78,9
Электрическая проводимость, См/м	0,00016 (5,5%-ный водный раствор)	0,00018

При моделировании распределения электрических полей вблизи наночастиц серебра в COMSOL Multiphysics был выбран интерфейс Electromagnetic Waves, Frequency Domain (*ewfd*) из раздела «Оптика». Для изучения фототермического эффекта в области ЛППР выполняли моделирование с применением интерфейса Heat Transfer in Solids and Fluids (*ht*) из раздела «Теплопередача». Волновой вектор падающего излучения был направлен перпендикулярно к плоскости излучения, а мощность излучения выбиралась исходя из ранее определенной мощности реального источника излучения и составила 2,65 мВт/м². Для модели соблюдались периодические граничные условия, а также применялись идеально согласованные слои (Perfectly Matched Layers, PML), которые позволяли исключить повторное переотражение излучения от границ области моделирования. Для решения систем линейных уравнений для каждого элемента сетки применялся линейный решатель MUMPS.

Результаты исследований и их обсуждение

Моделирование электродинамических свойств, а именно – распределения напряженности электрического поля вблизи наночастиц, производилось при различных расстояниях между ними и толщинах оболочки стабилизирующего агента. При этом подбирались параметры для получения возбуждающего излучения, которое формирует поле напряженностью 1 В/м, что позволяло напрямую получать распределения для значений коэффициента усиления напряженности электрического поля. Для одиночных наночастиц серебра было выяснено, что степень усиления

напряженности электрического поля вблизи частоты возбуждения ППР лежит в пределах от 8 до 10 раз, а электрическое поле локализуется на расстоянии до 10 нм от поверхности наночастиц. На частоте ППР усиление напряженности электрического поля достигает пикового значения (36–37 раз). Результаты моделирования коррелируют с экспериментальными данными, полученными для спектров поглощения наночастиц, зарегистрированных с помощью спектрофотометра МС 122. По спектрам определено, что длина волны, соответствующая максимуму поглощения света коллоидными наночастицами серебра, совпадает с длиной волны, при которой достигается максимум усиления электрического поля при моделировании наночастиц с оболочкой из сукцинат-ионов янтарной кислоты толщиной 0,3 нм (рис. 2).

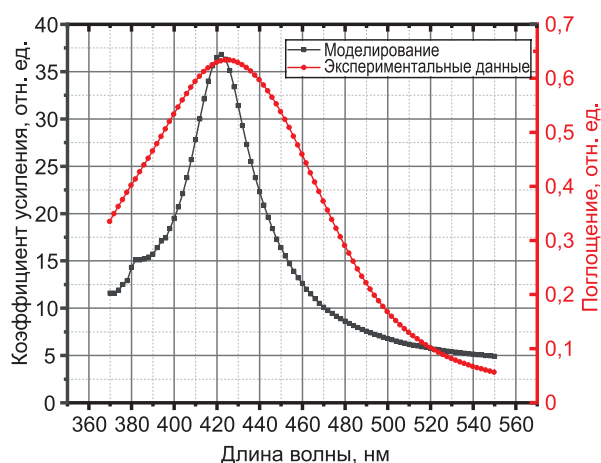


Рис. 2. Корреляция между результатами моделирования и экспериментальными данными
Fig. 2. Correlation between simulation results and experimental data

Также был проведен параметрический анализ зависимости степени усиления электрического поля от расстояния между парами наночастиц. Увеличение расстояния от 1 до 30 нм приводит к резкому убыванию коэффициента усиления с 86 до 8 раз. Наблюдаются две области резкого убывания коэффициента усиления в диапазоне от 1 до 3 нм (снижение с 86 до 35 раз) и от 10 до 20 нм (снижение с 27 до 10 раз). Отмечено, что при расстояниях между наночастицами от 1 до 5 нм область усиления электрического поля носит локальный характер (усиление наблюдается в области размером порядка 3×1 нм). На рис. 3 представлены зависимость степени усиления электрического поля от расстояния между наночастицами и профиль распределения напряженности электрического поля вблизи наночастиц.

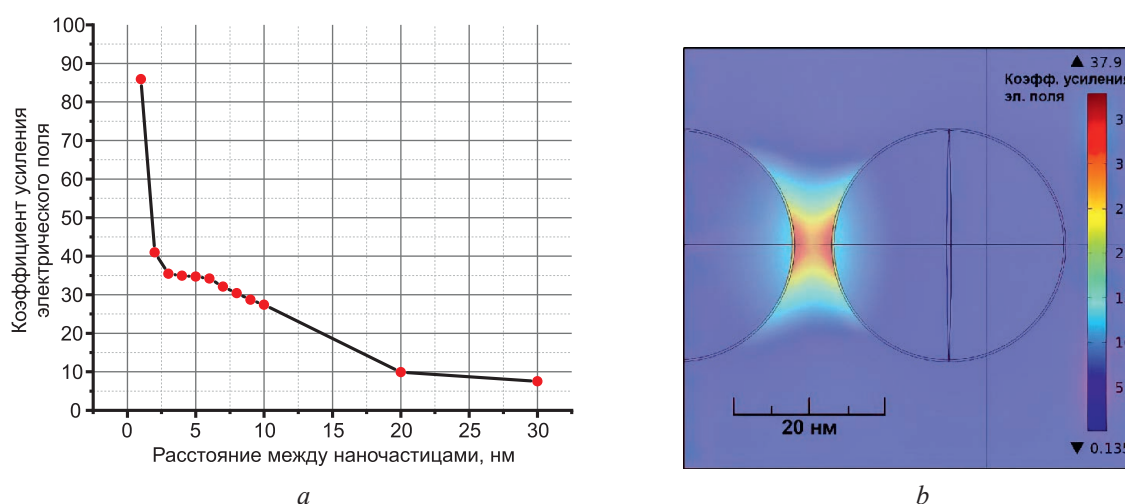


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления электрического поля от расстояния между наночастицами (a) и профиль распределения напряженности электрического поля вблизи поверхности наночастиц (b)
Fig. 3. Dependence of electric field enhancement factor on the distance between nanoparticles (a) and distribution profile of electric field strength near the surface of nanoparticles (b)

Установлено, что наличие оболочки приводит к слабо выраженному изменению характера распределения электрического поля вблизи наночастиц. При этом происходит незначительное уменьшение степени усиления электрического поля вблизи наночастицы (примерно в 1,3 раза). На рис. 4 представлены зависимости пиковых значений степени усиления электрического поля от толщины оболочки янтарной кислоты в диапазоне длин волн около полосы возбуждения ЛППР. Как следует из зависимостей, при увеличении толщины оболочки из сукцинат-ионов янтарной кислоты положение полосы ЛППР смещается в длинноволновую область. Это может быть связано с возникновением новой диэлектрической среды с отличной от ФСБ диэлектрической проницаемостью, что приводит к изменению поляризации наночастицы ($\alpha \sim \epsilon_{cp}$).

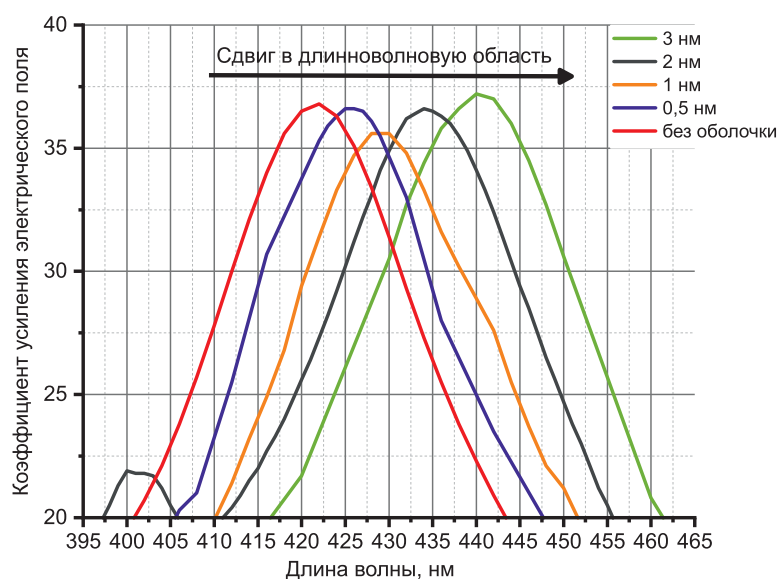


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления электрического поля в области локализованного поверхностного плазмонного резонанса от толщины оболочки стабилизирующего агента

Fig. 4. Dependence of the electric field enhancement factor in the region of localized surface plasmon resonance on the thickness of the stabilizing agent shell

Следующий шаг в теоретическом анализе наночастиц серебра с оболочкой из янтарной кислоты – моделирование фототермических свойств, а именно – нагрев наночастиц. Для оценки степени их нагрева под действием возбуждающего ЛППР-излучения строили отдельную модель, состоявшую из цепочки трех наночастиц с оболочкой, которые находились в сферической области моделирования с экранирующим PML-слоем. Принцип оценки степени нагрева состоял в расчете параметра сечения поглощения C_{abs} наночастиц и преобразовании его в мощность излучающего сферического источника диаметром 31 нм. Для расчета C_{abs} использовалось следующее выражение [10]:

$$C_{abs} = \frac{P_{abs}}{I}, \quad (1)$$

где P_{abs} – полная поглощенная энергия за единицу времени; I – полная интенсивность падающего излучения.

Значения P_{abs} находили путем интегрирования плотности мощности по всему объему наночастицы. В результате моделирования установлено, что облучение наночастиц без органической оболочки в диапазоне ЛППР 415–425 нм приводит к их нагреву до 86 °С, при этом наличие оболочки янтарной кислоты способствует росту температуры нагрева. Зависимости температуры нагрева поверхности наночастиц от толщины оболочки и профиль распределения температуры вблизи наночастиц представлены на рис. 5.

Из рис. 5, а видно, что температура поверхности наночастиц возрастает по мере утолщения оболочки. Это, скорее всего, связано с более низкими теплопроводностью и теплоемкостью янтарной кислоты (≈ 1350 Дж/(кг·°С) при 300 К) по сравнению с аналогичными параметрами ФСБ,

а также с увеличением площади активной поверхности, поглощающей энергию возбуждающего ЛППР-излучения. Температура окружающей среды вблизи наночастиц резко снижается: при отдалении от наночастицы на каждые 10 нм – примерно в два раза.

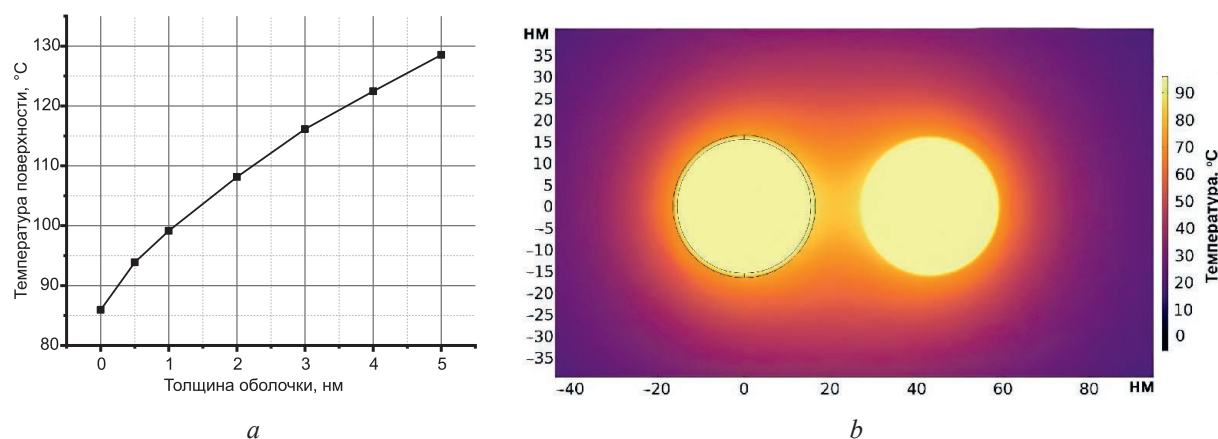


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности наночастиц от толщины оболочки (a) и температурный профиль распределения вблизи наночастиц серебра с оболочкой из янтарной кислоты толщиной 1 нм (b)

Fig. 5. Dependence of the surface temperature of nanoparticles on thickness of the shell (a) and temperature distribution profile near silver nanoparticles with 1 nm succinic acid shell (b)

Заключение

1. В процессе исследований установлено, что сферические наночастицы серебра диаметром 31 нм могут значительно усиливать электрическое поле вблизи их поверхности (до 37 раз для одиночных наночастиц и до 86 раз – для пары). Однако данное усиление происходит в достаточно локальной области – порядка нескольких нанометров (до 10×5 нм). Едва ли такая локализация электрического поля позволит добиться эффекта электропорации, поскольку глубина проникновения поля меньше толщины клеточных мембран (для бактериальных клеток толщина – не менее 10 нм).

2. Оболочка янтарной кислоты не вносит значимого вклада в распределение электрического поля, но приводит к небольшому уменьшению степени усиления электрического поля (ослабление в 1,3 раза), а также к смещению резонансной частоты наночастиц в длинноволновую область.

3. Облучение наночастиц излучением, соответствующим локализованному поверхностному плазмонному резонансу, приводит к значительному нагреву наночастиц. При этом наличие оболочки янтарной кислоты ведет к еще более интенсивному нагреву (выше 100 °C). Профиль распределения теплового поля вблизи наночастицы также носит локальный характер, но, в отличие от распределений электрического поля, глубина проникновения тепла соизмерима с толщиной бактериальной клеточной стенки.

4. Полученные результаты позволяют предположить, что наночастицы с параметрами, использованными при создании модели, применимы для фототермической инактивации клеток.

5. Исследования выполнены в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь ГБЦ № 23–3171 М.

Список литературы / References

1. Barbillon G. (2019) Plasmonics and Its Applications. *Materials*. 12 (9), 1502–1505. DOI: 10.3390/ma12091502.
2. Modena M. M., Rühle B., Burg T. P., Wuttke S. (2019) Nanoparticle Characterization: What to Measure? *Advanced Materials*. 31 (32). DOI: 10.1002/adma.201901556.
3. Phan H. T., Haes A. J. (2019) What Does Nanoparticle Stability Mean? *Journal of Physical Chemistry C*. 123 (27), 16495–16507. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b00913.
4. Altammar K. A. (2023) A Review on Nanoparticles: Characteristics, Synthesis, Applications, and Challenges. *Frontiers in Microbiology*. 14. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1155622.

5. González A. L., Noguez C. (2006) Influence of Morphology on the Optical Properties of Metal Nanoparticles. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 4 (2), 231–238. DOI: 10.1166/jctn.2007.2309.
6. Arif M. S., Ulfiya R., Erwin, Panggabean A. S. (2021) Synthesis Silver Nanoparticles Using Trisodium Citrate and Development in Analysis Method. *AIP Conf. Proc.* 2360 (1). DOI: 10.1063/5.0059493.
7. Barysiuk A. A., Bandarenka H. V. (2024) Modeling of Electrodynamical Properties of Colloidal Plasmonic Silver Nanoparticles Coated with a Stabilizing Agent. *Electronic Design Automation Conference Proceedings*. 67–70.
8. Wang L., Kafshgari M. H., Meunier M. (2020) Optical Properties and Applications of Plasmonic-Metal Nanoparticles. *Advanced Functional Materials*. 30 (51). DOI: 10.1002/adfm.202005400.
9. Johnson P. B., Christy R. W. (1972) Optical Constants of the Noble Metals. *Phys. Rev. B*. 6 (12). DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
10. McHale J. L. (1999) *Molecular Spectroscopy*. NJ, Prentice Hall, Upper Saddle River.

Поступила 03.03.2025

Received: 3 March 2025

Принята в печать 09.04.2025

Accepted: 9 April 2025

Вклад авторов

Борисюк А. А. осуществил постановку задачи исследования, разработал модель для моделирования, выполнил интерпретацию результатов, подготовил рукопись статьи.

Бондаренко А. В. осуществила постановку задачи для проведения исследования, выполнила окончательное формирование рукописи статьи.

Authors' contribution

Barysiuk A. A. formulated the research problem, developed the model for simulation, interpreted the results, and prepared the manuscript of the article.

Bandarenka H. V. formulated the task for conducting the study and completed the final drafting of the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Борисюк А. А., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Бондаренко А. В., д-р техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Прикладная плазмоника», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 752-51-44
E-mail: h.bandarenka@bsuir.by
Бондаренко Анна Витальевна

Information about the authors

Barysiuk A. A., Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Bandarenka H. V., Dr. Sci. (Tech.), Associate Prof., Head of the Research Laboratory “Applied Plasmonics”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 752-51-44
E-mail: h.bandarenka@bsuir.by
Bandarenka Hanna Vital'euna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-92-100>

УДК 514.742.2

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕГА У ДЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЙ

Г. Г. ГРИГОРЬЕВА¹, Н. С. ДАВЫДОВА², В. Е. ВАСЮК³, К. Э. ШУКУРОВ⁴

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет физической культуры (Минск, Республика Беларусь)

⁴Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми
(Ташкент, Республика Узбекистан)

Аннотация. Представлен алгоритмический подход к анализу кинематических параметров бега у детей с использованием безмаркерных систем захвата движений. Проанализированы ключевые аспекты эффективности беговых локомоций, разработаны алгоритмы расчета временных и пространственных параметров бега на основе матриц координат биокинематических ориентиров тела человека. Предлагаемая методика анализа данных обеспечивает получение высокоточных количественных показателей, что, в свою очередь, способствует более углубленному биомеханическому исследованию спортивных движений у детей. Такой подход не только повышает достоверность полученных результатов, но и открывает новые горизонты для дальнейших исследований в области физического воспитания и спортивной медицины.

Ключевые слова: бег, захват движений, биомеханический анализ, кинематические параметры, векторная алгебра, цифровая обработка сигналов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Анализ кинематических параметров бега у детей на основе захвата движений / Г. Г. Григорьева [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-92-100>.

ANALYSIS OF KINEMATIC PARAMETERS OF RUNNING IN CHILDREN BASED ON MOTION CAPTURE

GARSIIA G. GRIGORIEVA¹, NADEZHDA S. DAVYDOVA², VALERY E. VASSIOUK³,
KAMOLIDDIN E. SHUKUROV⁴

¹Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State University of Physical Culture (Minsk, Republic of Belarus)

⁴Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
(Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. An algorithmic approach to the analysis of kinematic parameters of running in children using markerless motion capture systems is presented. Key aspects of the efficiency of running locomotion are analyzed, algorithms for calculating temporal and spatial parameters of running based on the matrices of coordinates of biokinematic landmarks of the human body are developed. The proposed data analysis technique provides highly accurate quantitative indicators, which, in turn, contributes to a more in-depth biomechanical study of sports movements in children. This approach not only increases the reliability of the results obtained, but also opens up new horizons for further research in the field of physical education and sports medicine.

Keywords: running, motion capture, biomechanical analysis, kinematic parameters, vector algebra, digital signal processing.

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

For citation. Grigorieva G. G., Davydova N. S., Vassiouk V. E., Shukurov K. E. (2025) Analysis of Kinematic Parameters of Running in Children Based on Motion Capture. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-92-100> (in Russian).

Введение

Бег, как одна из базовых форм физической активности, играет ключевую роль в развитии двигательных навыков [1, 2]. Важность раннего выявления двигательной одаренности становится все более актуальной, так как помогает в дальнейшем распределении ресурсов тренировок и создании специализированных программ [3, 4].

Существующие методы оценки общей координации и техники бега, в частности, основаны на анализе кинематических параметров. В этой связи наиболее подходящим для анализа кинематических параметров бега является метод захвата движения (motion capture), предоставляющий широкий спектр возможностей для измерений и автоматической обработки данных [5]. Камеры фиксируют движения, создавая поток изображений, которые затем обрабатываются в реальном времени [6]. Безмаркерная технология исключает необходимость в применении маркеров, что облегчает процесс тестирования и уменьшает вероятность вмешательства в естественные движения детей.

Цель исследования – разработка методики анализа кинематических параметров бега у детей на основе захвата движений, что позволит автоматизировать процесс оценки двигательных способностей у детей при спортивной дифференциации. В статье представлены алгоритмы для анализа временных и пространственных параметров, что дает возможность применить результаты исследования на практике в сфере физической культуры и спорта.

Алгоритмы вычислений кинематических параметров бега

Для анализа беговых локомоций у детей использовали систему безмаркерного захвата движения на основе программного обеспечения, разработанного компанией Simi Reality Motion Systems GmbH (Германия). С помощью этой системы осуществлялась регистрация бега с частотой 100 Гц. Результатом отслеживания движения явилась кинематическая модель тела человека, которая строилась из ключевых биокинематических ориентиров и в точности повторяла все движения во время выполнения беговых ускорений. При этом используемая система регистрации данных не имела критического значения, так как предлагаемый алгоритм является универсальным.

В качестве исходных данных для анализа принимались матрицы координат биокинематических ориентиров. С целью оптимизации алгоритмов вычислений кинематических параметров производилась селекция неиспользуемых биокинематических ориентиров: ступни, туловища, нижнего и верхнего отделов позвоночного столба, черепа. В процессе селекции были выявлены активные биокинематические ориентиры, для расчета которых использовались обозначения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Активные биокинематические ориентиры
Table 1. Active biokinematic landmarks

Биокинематический ориентир	Обозначение для расчета			Звено тела
Тазобедренный сустав	$Y_{ТБС}$	$Z_{ТБС}$	$X_{ТБС}$	Бедро
Коленный сустав	$Y_{КС}$	$Z_{КС}$	$X_{КС}$	
Коленный сустав	$Y_{КС}$	$Z_{КС}$	$X_{КС}$	Голень
Голенистоопный сустав	$Y_{ГСС}$	$Z_{ГСС}$	$X_{ГСС}$	
Средняя часть стопы/стопа	$Y_{СТ}$	$Z_{СТ}$	$X_{СТ}$	Стопа
Таз	$Y_{ТАЗ}$	$Z_{ТАЗ}$	$X_{ТАЗ}$	Туловище
Шея	$Y_{ШЕЯ}$	$Z_{ШЕЯ}$	$X_{ШЕЯ}$	
Плечевой сустав	$Y_{ПС}$	$Z_{ПС}$	$X_{ПС}$	Плечо
Локтевой сустав	$Y_{ЛС}$	$Z_{ЛС}$	$X_{ЛС}$	
Локтевой сустав	$Y_{ЛС}$	$Z_{ЛС}$	$X_{ЛС}$	Предплечье
Запястье	$Y_{ЗАП}$	$Z_{ЗАП}$	$X_{ЗАП}$	
Основание черепа	$Y_{ЧЕР}$	$Z_{ЧЕР}$	$X_{ЧЕР}$	Голова

Анализ кинематических параметров бега у детей на основе захвата движений строился на основе матриц данных, содержащих координаты ключевых анатомических ориентиров тела человека, и включал следующие этапы:

- предварительная обработка данных;
- выбор кинематических параметров бега;
- расчет временных параметров бега;
- расчет пространственных параметров бега.

Предварительная обработка данных включала в себя фильтрацию сигналов и коррекцию траектории движения человека. В первом случае для повышения точности анализа и снижения влияния шумовой компоненты на регистрируемые сигналы применялся метод фильтрации. При проведении исследований использовали метод скользящего среднего (или фильтр скользящего среднего), который позволял сгладить временной ряд данных и уменьшить уровень случайного шума. Скользящее среднее может быть задано следующей формулой:

$$y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[i+j], \quad (1)$$

где N – ширина окна фильтра; $x[i]$, $y[i]$ – входной и выходной сигналы.

При коррекции траектории движения человека для достижения достоверных результатов необходима коррекция координат траектории движения в соответствии с глобальной системой координат [7]. Коррекция траектории движения осуществлялась на основе общего центра тяжести (ОЦТ), координаты которого рассчитывались по формулам:

$$Y_{\text{ОЦТ}} = \frac{\sum_{n=1}^m y_n P_n}{\sum_{n=1}^m P_n}; \quad (2)$$

$$X_{\text{ОЦТ}} = \frac{\sum_{n=1}^m x_n P_n}{\sum_{n=1}^m P_n}, \quad (3)$$

где y_n , x_n – координата центра тяжести n -го звена тела по горизонтальной и поперечной осям соответственно; m – общее количество звеньев тела; P_n – вес n -го звена тела.

Далее определялся угол отклонения траектории ОЦТ от горизонтальной оси, затем с помощью матрицы поворота производилась корректировка локальных координат к глобальной системе [7, 8].

Выбор кинематических параметров бега

Для расчета кинематических параметров бега необходимо выделить опорную и безопорную части беговых локомоций. Опорной частью беговых локомоций считается промежуток времени непосредственного взаимодействия спортсмена с поверхностью опоры (с момента постановки стопы на опору до момента ее отрыва от опоры), безопорной – промежуток времени безопорного положения. С целью упрощения анализа введем обозначения для ключевых временных моментов, характеризующих процесс движения:

- t_1 – момент постановки ноги на опору;
- t_2 – момент достижения минимума траектории ОЦТ;
- t_3 – момент отрыва ноги от опоры;
- t_4 – момент достижения максимума траектории ОЦТ.

Данные временные метки являются критическими для дальнейшего анализа кинематических параметров и позволяют более точно оценить динамику движений в исследуемых фазах. В целях достижения наибольшей эффективности анализа кинематических параметров бега были отображены наиболее значимые временные и пространственные характеристики [5, 9, 10].

Расчет временных параметров бега

Для построения временной структуры бегового цикла на основе координат, полученных из систем захвата движения, необходима диагностика критических временных событий для выделения ключевых временных интервалов бега, а именно – периода полета и периода опоры. Эти временные моменты могут быть определены на основании анализа сигнала угловой скорости голени в сагиттальной плоскости YZ от времени с обозначенными локальными экстремумами, соответствующими началу и завершению опорной части беговых локомоций, и выделенными периодами (рис. 1, *a*) и траектории движения ОЦТ с обозначенными локальными экстремумами, соответствующими моментам максимума и минимума траектории ОЦТ (рис. 1, *b*).

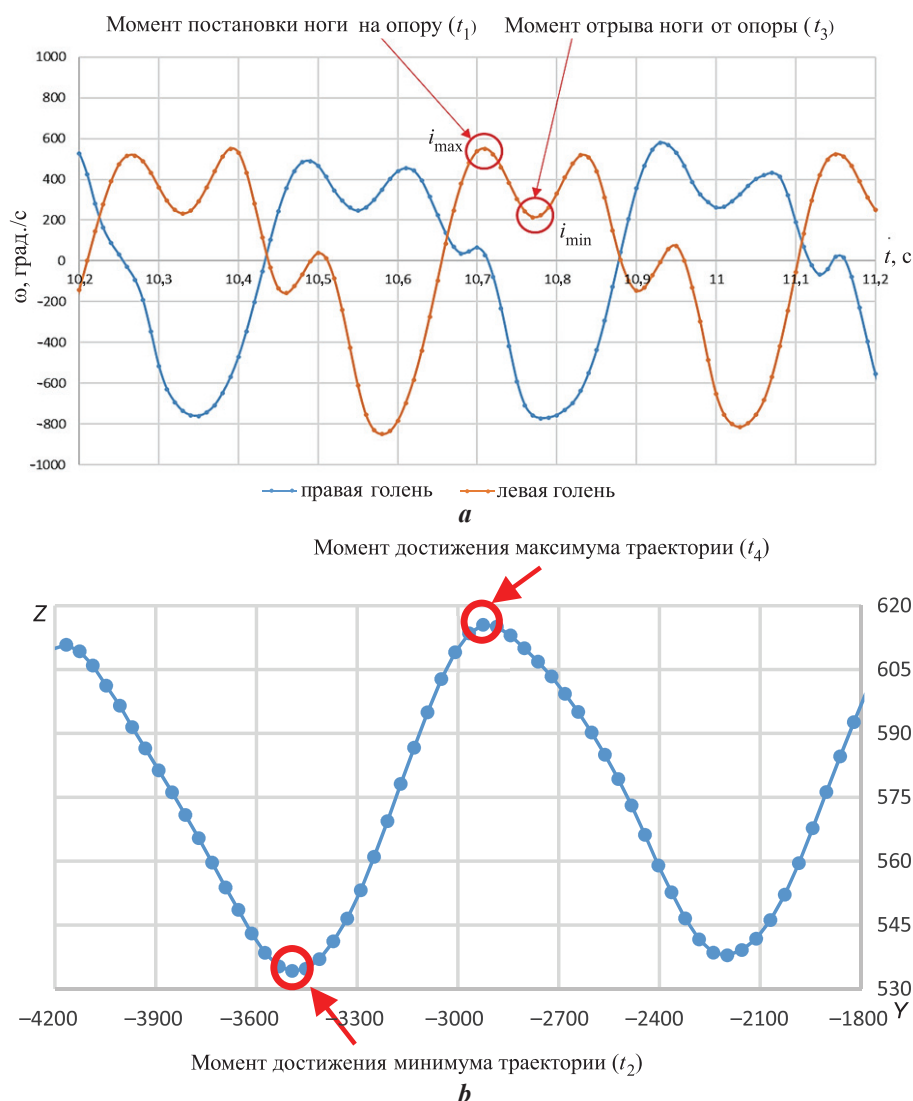


Рис. 1. Зависимость угловой скорости голени в сагиттальной плоскости YZ от времени (*a*) и траектория движения общего центра тяжести (*b*)

Fig. 1. Dependence of the angular velocity of the tibia in the sagittal plane YZ on time (*a*) and the trajectory of the general center of gravity (*b*)

Алгоритм для определения временных параметров включал следующие этапы.

1. Расчет длины голени по координатам суставов колена и голеностопа с использованием формулы вычисления евклидова расстояния

$$L_T = \sqrt{(Y_{ГСС} - Y_{КС})^2 + (Z_{ГСС} - Z_{КС})^2}, \quad (4)$$

где $Y_{ГСС}$, $Y_{КС}$, $Z_{ГСС}$, $Z_{КС}$ – координаты голеностопного и коленного суставов по горизонтальной и вертикальной осям соответственно.

2. Определение угла отклонения голени α относительно горизонтальной оси с использованием тригонометрической функции

$$\alpha = \arccos\left(\frac{Y_{ГСС} - Y_{КС}}{L_{\Gamma}}\right), \quad (5)$$

где L_{Γ} – длина голени.

На рис. 2 показан пример расположения угла голени относительно горизонтали.

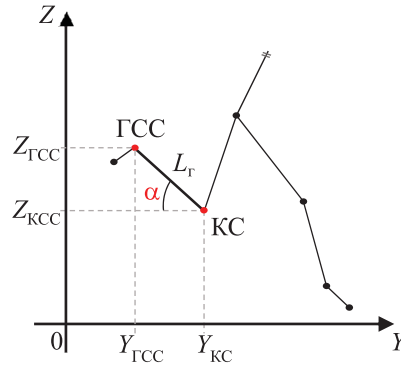


Рис. 2. Пример расположения угла голени относительно горизонтали
Fig. 2. Example of the location of the tibia angle relative to the horizontal

3. Определение угловой скорости голени, которая характеризует изменение во времени углового положения голени относительно горизонтали:

$$\omega_{\Gamma}^i = \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{dt}, \quad (6)$$

где ω_{Γ}^i – угловая скорость голени в момент времени i ; dt – время дискретизации; α_i, α_{i-1} – угол отклонения голени от горизонтали в момент времени i и $i-1$ соответственно.

4. Определение моментов времени t_1 и t_3 на основании идентификации локальных экстремумов на кривой угловой скорости голени. Точка $i_{\max}$ называется точкой локального максимума функции $x[i]$, если для всех i из окрестности этой точки будет справедливо строгое неравенство

$$x[i] < x[i_{\max}]. \quad (7)$$

Точка $i_{\min}$ называется точкой локального минимума функции $x[i]$, если для всех i из окрестности этой точки будет справедливо строгое неравенство

$$x[i] > x[i_{\min}]. \quad (8)$$

5. Определение моментов времени t_2 и t_4 на основании идентификации значения минимальных и максимальных точек траектории ОЦТ.

6. Определение длительности периодов опоры ($\Delta t_{\text{опоры}}$) и полета ($\Delta t_{\text{полета}}$):

$$\Delta t_{\text{опоры}} = t_{3o} - t_{1o}; \quad (9)$$

$$\Delta t_{\text{полета}} = t_{1m} - t_{3o}, \quad (10)$$

где «о», «м» – значения опорной и противоположной (маховой) ног.

Расчет пространственных параметров бега

1. Определяли вертикальное колебание ОЦТ как разность максимального и минимального значений траектории движения ОЦТ по вертикальной оси

$$\Delta Z = Z_{\max} - Z_{\min}, \quad (11)$$

где $Z_{\max}, Z_{\min}$ – максимальное и минимальное значения ОЦТ по вертикальной оси.

2. Определяли боковое смещение ОЦТ как разность максимального и минимального значений траектории движения ОЦТ по горизонтальной оси

$$\Delta X = X_{\max} - X_{\min}, \quad (12)$$

где $X_{\max}$, $X_{\min}$ – максимальное и минимальные значения ОЦТ по горизонтальной оси.

3. Вычисляли длину шага с использованием вертикальных и горизонтальных координат стоп Y_{CT} , Z_{CT} . Расчет длины шага l_u производился с применением формулы евклидова расстояния в сагиттальной плоскости

$$l_u = \sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}, \quad (13)$$

где Z_1 , Y_1 , Z_2 , Y_2 – координаты стопы опорной и маховой ног соответственно в момент времени t_1 .

4. Углы отклонения одного звена от вертикали в момент постановки ноги на опору t_1 включают:

- угол наклона туловища $\varphi_{T,t1}$;
- угол бедра маховой ноги $\varphi_{B,t1}$;
- угол наклона голени опорной ноги $\varphi_{Г,t1}$.

Для определения данных углов сначала производился расчет длины звена тела n -го L_n с помощью формулы (4) для вычисления евклидова расстояния, основанной на проксимальных и дистальных координатах звена. Затем угол отклонения звена тела относительно вертикальной оси рассчитывали с использованием тригонометрической функции

$$\varphi_n^{t1} = \arcsin\left(\frac{Y_1 - Y_2}{L_n}\right), \quad (14)$$

где φ_n^{t1} – угол отклонения звена n в момент времени t_1 ; Y_1 , Y_2 – дистальная и проксимальная координаты звена тела по горизонтальной оси в момент постановки ноги на опору соответственно.

5. Углы между двумя звеньями тела в момент постановки ноги на опору t_1 и в момент отрыва ноги от опоры t_3 включают:

- углы тазобедренного сустава $\varphi_{ТБС,t1}$, $\varphi_{ТБС,t3}$;
- углы коленного сустава $\varphi_{КС,t1}$, $\varphi_{КС,t3}$;
- углы голеностопного сустава $\varphi_{ГСС,t1}$, $\varphi_{ГСС,t3}$;
- угол между бедрами $\varphi_{МБ,t3,4}$.

Примеры расположения углов между двумя звеньями тела во время бега показаны на рис. 3.

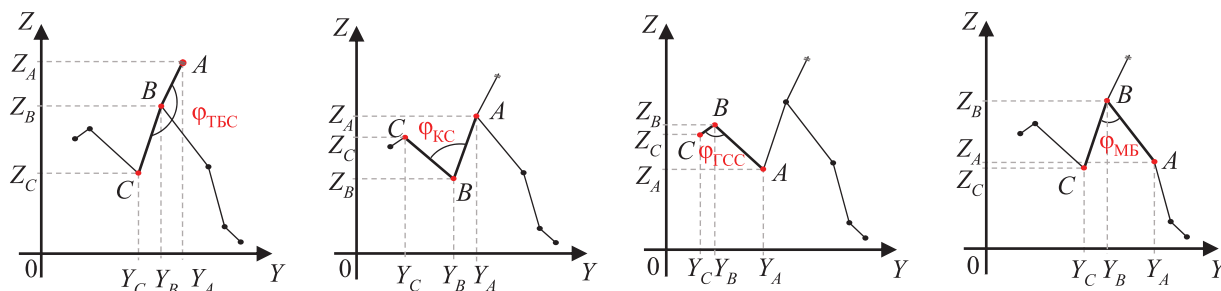


Рис. 3. Примеры расположения углов между двумя звеньями тела

Fig. 3. Examples of the arrangement of angles between two body links

Расчет угла между двумя векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$ в соответствии с векторной алгеброй выполняли по формуле

$$\cos \varphi = \frac{\vec{a}\vec{b}}{|\vec{a}||\vec{b}|}. \quad (15)$$

Соответственно угол между двумя звеньями тела во время бега определяли следующим образом:

$$\varphi_p^i = \arccos \left[\frac{(Y_c - Y_{\pi})(Y_d - Y_c) + (Z_c - Z_{\pi})(Z_d - Z_c)}{\sqrt{(Y_c - Y_{\pi})^2 + (Z_c - Z_{\pi})^2} \sqrt{(Y_d - Y_c)^2 + (Z_d - Z_c)^2}} \right], \quad (16)$$

где φ_p^i – угол сустава «р» в момент времени i ; «п, с, д» – координаты проксимального сустава, сустава по середине и дистального сустава соответственно.

Разработанные алгоритмы обеспечивают количественную оценку кинематических параметров движений, что дает возможность проводить детализированное исследование биомеханики беговых локомоций у детей. Данный подход позволяет разработать научно обоснованные рекомендации по коррекции беговой техники, а также способствует созданию адаптированных индивидуализированных тренировочных программ с учетом возрастных особенностей детского организма.

Заключение

1. Выполнен анализ и представлены алгоритмы расчета кинематических параметров бега у детей на основе захвата движений. Полученные результаты освещают ряд важнейших аспектов, касающихся двигательной активности детей, и могут иметь широкое практическое применение как в спортивной подготовке, так и в области физической культуры.

2. Приведены алгоритмы расчета наиболее информативных кинематических параметров беговых локомоций у детей. Отмечен потенциал технологии захвата движения в анализе кинематических параметров с целью оптимизации диагностики тренировочного процесса и повышения спортивных результатов. Введение алгоритмических подходов к расчету ключевых параметров позволяет точнее учитывать индивидуальные особенности детей, что сделает дальнейшее наблюдение тренировочного процесса более целенаправленным и эффективным.

3. Рассмотренные кинематические характеристики создают основу для последующих исследований и внедрения полученных данных в практическую деятельность тренеров и специалистов в области здоровья и физической активности.

Список литературы

1. Kiely, J. Uniqueness of Human Running Coordination: The Integration of Modern and Ancient Evolutionary Innovations [Electronic Resource] / J. Kiely, D. Collins // *Frontiers in Psychology*. 2016. Vol. 7. Mode of access: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsy.2016.00262>. Date of access: 05.02.2024.
2. Spittler, J. Current Trends in Ultramarathon Running / J. Spittler, L. Oberle // *Current Sports Medicine Reports*. 2019. No 18. P. 387–393.
3. Курамшин, Ю. Ф. Оценка спортивной одаренности детей на основе индивидуально-типологического подхода [Электронный ресурс] / Ю. Ф. Курамшин, О. А. Двейрина, В. С. Терехин // *Теория и практика физической культуры*. 2022. № 4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sportivnoy-odarennosti-detey-na-osnove-individualno-tipologicheskogo-podhoda>.
4. Cagno, A. Motor Learning as Young Gymnast's Talent Indicator / A. Cagno, C. Battaglia // *Sports Sci Med*. 2014. Vol. 13, No 4. P. 767–773.
5. Турантаева, Г. Г. Оценка двигательной одаренности детей на основе анализа беговых локомоций / Г. Г. Турантаева, Н. С. Давыдова, В. Е. Васюк // *От международных спортивных игр «Дети Азии» к университетскому спорту: сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. в рамках VIII Междунар. спорт. игр «Дети Азии» и 25-летнего юбилея Чурапчинского гос. ин-та физ. культ. и спорта, г. Якутск, 4–5 июля 2024 г. Якутск: Дани-Алмас, 2024. С. 299–303.*
6. Simi Reality Motion Systems [Electronic Resource]. Mode of access: <https://simishape.com>. Date of access: 26.05.2023.
7. Алгоритм коррекции траектории движения спортсменов на базе матрицы поворота / Г. Г. Турантаева [и др.] // *BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2025. С. 97–102.*
8. Rotation-Matrix [Electronic Resource]. Mode of Access: <https://www.geeksforgeeks.org/rotation-matrix>. Date of access: 16.01.2025.

9. Турантаева Г. Г. Детерминированная биомеханическая. модель бега / Г. Г. Турантаева, Н. С. Давыдова, В. Е. Васюк // Физическая культура, спорт, наука и образование: сб. матер. VIII Всерос. науч.-практ. конф., Чурапча, 10 апр. 2024 г. Чурапча: Чурапч. гос. ин-т физич. культ. и спорта, 2024. С. 184–190.
10. Возможности применения систем «захвата движений» в оценке эффективности беговых локомоций детей / Г. Г. Турантаева [и др.] // Современные направления инновационных исследований молодых ученых в области физической культуры и спорта: сб. матер. II Всерос. науч.-практ. конф., 25–26 апр. 2024 г. СПб.: С.-Петерб. науч.-исслед. ин-т физич. культ., 2024.

Поступила 16.05.2025

Принята в печать 24.06.2025

References

1. Kiely J., Collins D. (2016) Uniqueness of Human Running Coordination: The Integration of Modern and Ancient Evolutionary Innovations. *Frontiers in Psychology*. 7. Available: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsy.2016.00262> (Accessed 5 February 2024).
2. Spittler J., Oberle L. (2019) Current Trends in Ultramarathon Running. *Current Sports Medicine Reports*. (18), 387–393.
3. Kuramshin Yu. F., Dveirina O. A., Terekhin V. S. (2022) Evaluation of Sports Giftedness of Children on the Basis of Individual-Typological Approach. *Theory and Practice of Physical Education*. (4). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sportivnoy-odarennosti-detey-na-osnove-individualno-tipologicheskogo-podhoda> (in Russian).
4. Cagno A., Battaglia C. (2014) Motor Learning as Young Gymnast's Talent Indicator. *Sports Sci Med*. 13 (4), 767–773.
5. Turantaeva G. G., Davydova N. S., Vasyuk V. E. (2024) Assessment of Motor Giftedness of Children Based on the Analysis of Running Locomotion. *From the International Sports Games "Children of Asia" to University Sports, Collection of Scientific Papers of the International Scientific Conference within the Framework of the VIII International Sports Games "Children of Asia" and the 25th Anniversary of the Churapchinsky State Institute of Physical Culture and Sports, Yakutsk, July 4–5. Yakutsk, Dani-Almas Publ.* 299–303 (in Russian).
6. *Simi Reality Motion Systems*. Available: <https://simishape.com> (Accessed 26 May 2023).
7. Turantaeva G. G., Davydova N. S., Vasyuk V. E., Tatarko K. I. (2025) Algorithm of Athlete's Trajectory Correction Based on Rotation Matrices. *BIG DATA and Advanced Analytics, Collection of Scientific Articles of the XI International Scientific and Practical Conference*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 97–102 (in Russian).
8. *Rotation-Matrix*. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/rotation-matrix> (Accessed 16 January 2025).
9. Turantaeva G. G., Davydova N. S., Vasyuk V. E. (2024) Deterministic Biomechanical Model of Running. *Physical Education, Sports, Science and Education, Collection of Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference, Churapcha, Apr. 10. Churapcha, Churapcha State Institute of Physical Culture and Sports*. 184–190 (in Russian).
10. Turantaeva G. G., Guseinov D. I., Davydova N. S., Vasyuk V. E. (2024) Possibilities of Using Motion Capture Systems in Assessing the Effectiveness of Children's Running Locomotion. *Modern Directions of Innovative Research of Young Scientists in the Field of Physical Culture and Sports: Collection of Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Apr. 25–26. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Scientific-Research Institute for Physical Culture*. 284–290 (in Russian).

Received: 16 May 2025

Accepted: 24 June 2025

Вклад авторов

Григорьева Г. Г. разработала алгоритм анализа данных, собрала и систематизировала фактические данные, подготовила рукопись статьи.

Давыдова Н. С. поставила задачу исследования, сформулировала гипотезы, разработала структуру статьи.

Васюк В. Е. проанализировал и интерпретировал результаты исследования.

Шукуров К. Э. провел обзор литературы, аргументировал выбор методов исследования.

Authors' contribution

Grigorieva G. G. developed an algorithm for data analysis, collected and systematized the actual data, prepared the manuscript of the article.

Davydova N. S. set the research task, formulated hypotheses, and developed the structure of the article.

Vassiouk V. E. analyzed and interpreted the results of the study.

Shukurov K. E. conducted a literature review and substantiated the choice of research methods.

Сведения об авторах

Григорьева Г. Г., асп. каф. спортивной инженерии, Белорусский национальный технический университет

Давыдова Н. С., канд. техн. наук, доц. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Васюк В. Е., канд. пед. наук, доц., вед. спец. центра координации научно-методической и инновационной деятельности, Белорусский государственный университет физической культуры

Шукуров К. Э., канд. техн. наук, доц. каф. искусственного интеллекта, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 65
Белорусский национальный
технический университет
Тел.: +375 33 916-42-12
E-mail: ga_et@inbox.ru
Григорьева Гарсия Гаврильевна

Information about the authors

Grigorieva G. G., Postgraduate of the Department of Sports Engineering, Belarusian National Technical University

Davydova N. S., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Academic Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vassiouk V. E., Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, Leading Specialist at the Center for Coordination of Scientific, Methodological and Innovative Activities, Belarusian State University of Physical Culture

Shukurov K. E., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty Ave., 65
Belarusian National
Technical University
Tel.: +375 33 916-42-12
E-mail: ga_et@inbox.ru
Grigorieva Garsiia Gavrilievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-101-108>

УДК 004.8:004.738.1

ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН ВЕБ-РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЦВЕТОВЫХ РЕШЕНИЙ НА ВОСПРИЯТИЕ КОНТЕНТА

Е. С. ПИСКУН, У. А. МАКСИМЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния цветовых решений на восприятие веб-ресурсов в рамках визуальной части продукта (UI) и общего восприятия и ощущений пользователя при взаимодействии с продуктом (UX). Проанализированы особенности построения и выбора цветовой схемы веб-ресурса на примере банка с учетом восприятия пользователя. С применением Figma AI получен генеративный дизайн ресурса, проведен анализ предложенной цветовой схемы элементов сайта и обозначены недостатки алгоритмического подхода в подборе цветовых решений на восприятие контента пользователями.

Ключевые слова: генеративный подход, дизайн веб-ресурсов, Figma AI.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пискун, Е. С. Генеративный дизайн веб-ресурсов с учетом влияния цветовых решений на восприятие контента / Е. С. Пискун, У. А. Максимчук // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 101–108. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-101-108>.

GENERATIVE DESIGN TO WEB RESOURCES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF COLOR SOLUTIONS ON THE PERCEPTION OF CONTENT

EKATERINA S. PISKUN, ULYANA A. MAKSIMCHUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of the influence of color schemes on the perception of web resources within the visual part of the product (UI) and the overall perception and sensations of the user when interacting with the product (UX). The features of the construction and selection of the color scheme of the web resource are analyzed using the example of a bank, taking into account the user's perception. Using Figma AI, a generative design of the resource was obtained, an analysis of the proposed color scheme of the site's elements was carried out, and the shortcomings of the algorithmic approach to the selection of color solutions on the perception of content by users were identified.

Keywords: generative approach, web resource design, Figma AI.

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

For citation. Piskun E. S., Maksimchuk U. A. (2025) Generative Design to Web Resources Taking Into Account the Influence of Color Solutions on the Perception of Content. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 101–108. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-101-108> (in Russian).

Введение

Восприятие пользовательского интерфейса начинается задолго до первого осознанного взаимодействия с элементами. В [1–5] показано, что пользователь интуитивно формирует эмоциональную и когнитивную оценку увиденного еще до первого клика или прочтения текста. В этой быстрой реакции ключевую роль играет цветовое оформление интерфейса, используемое не только как декоративный прием, но и как инструмент воздействия на внимание, настроение, поведенческие реакции и даже уровень доверия к продукту.

Дизайнер, обладающий опытом и эмпатией, работает с цветом, опираясь не только на цветовые модели, но и на психологию восприятия, эргономику и задачи бренда. Данные, приведенные в [6–9], показывают, что даже незначительные отклонения в палитре могут повлиять на поведение пользователя, повысить или понизить его уверенность, затруднить навигацию или, наоборот, создать ощущение интуитивной понятности.

Появление искусственного интеллекта (ИИ) в дизайне стало одним из наиболее значимых событий в прототипировании интерфейсов. Благодаря развитию технологий машинного обучения и обработки больших данных ИИ предоставляет новые возможности для создания персонализированных решений. Он позволяет автоматизировать рутинные задачи (генерация вариантов макетов, подбор цветовых схем и т. д.), а также способен анализировать поведение пользователей и предлагать дизайн-решения, максимально соответствующие их потребностям и предпочтениям.

В статье выполнен анализ двух интерфейсов, идентичных по структуре, функциям и содержанию, но отличающихся по цветовому оформлению. Первый интерфейс был разработан профессиональной командой дизайнеров с учетом принципов UI/UX-психологии и визуального баланса, а второй создан с использованием плагина Figma AI [10], который предложил палитру на основе внутреннего анализа логики интерфейса и общих метрик.

Принцип работы генеративных алгоритмов в разработке дизайна интерфейсов

Искусственный интеллект анализирует множество факторов, включая психологические эффекты цвета, поведенческие предпочтения пользователей, культурные контексты, а также общие визуальные тренды. Таким образом, решения, предложенные ИИ, представляют собой не просто набор цветов, а целый комплекс, учитывающий как функциональность, так и эмоциональную реакцию, которую вызывает дизайн.

В 2025 г. в одном из самых популярных инструментов у дизайнеров Figma, являющегося онлайн-сервисом для разработки интерфейсов и прототипирования, вышел плагин, который использует ИИ на основе текстовых запросов – Figma AI. Он использует обширный массив данных, включающий сотни тысяч готовых дизайнов, пользовательских взаимодействий, UI-паттернов и актуальных трендов, что позволяет генерировать визуально и когнитивно обоснованные решения, адаптированные под конкретную задачу или бренд (банковский интерфейс, мобильное приложение или маркетинговый лендинг и т. д.).

На начальном этапе происходит обучение модели, в ходе которого ИИ воспринимает и понимает визуальные элементы – формы, цвета, шрифты, компоновку и другие графические компоненты. Модель анализирует большие массивы данных: изображения, интерфейсы, различные дизайнерские решения и их контекст. Аналогично тому, как человек учится через восприятие, на этом этапе ИИ формирует когнитивные связи между элементами дизайна и их функциональными значениями. Модель «запоминает» оптимальные сочетания цветов, вызывающие нужное восприятие у пользователей, а также определяет, какие элементы интерфейса лучше подходят для конкретных целей и как они взаимодействуют между собой. Этот процесс обучения требует большого объема данных и времени, чтобы ИИ научился определять и интерпретировать детали, которые на первый взгляд могут казаться не очевидными. В результате создается система, способная распознавать шаблоны, стилистические элементы и их гармоничные сочетания.

Следующим этапом является интерпретация (понимание контекста), т. е. ИИ начинает не только распознавать элементы, но и понимать их контекст. Это означает, что модель не просто анализирует форму или цвет в отрыве от реального применения, а «осознает», как они будут восприниматься в конкретной ситуации, на определенной странице или в специфическом проекте. Данный этап позволяет ИИ интегрировать все полученные знания в конкретную задачу и провести анализ требований к проекту: его целевую аудиторию, функциональные цели, индуст-

рию, в которой используется дизайн, и т. д. Важным аспектом здесь является способность ИИ воспринимать психологические, культурные и когнитивные аспекты восприятия, что критично для выбора оптимальных цветовых решений, контраста, шрифтов и других дизайнерских элементов. Например, для банковского сайта ИИ будет интерпретировать цветовые схемы с учетом значимости доверия, безопасности и стабильности. Для дизайнерских проектов с молодежной аудиторией целесообразно сделать акцент на ярких и насыщенных цветах. Все это происходит в режиме реального времени, и ИИ принимает решение исходя из глубокого анализа контекста.

Итоговым шагом является генерация, а именно – создание цветового решения. Здесь ИИ применяет все свои знания, чтобы предложить дизайн, который будет оптимально сочетать все элементы, учитывая поставленные задачи и контекст. Например, Figma AI может использовать разнообразные методы оптимизации, такие как анализ предпочтений пользователей, оценка визуальной привлекательности и функциональности, а также применение принципов юзабилити и доступности. Модель генерирует различные варианты дизайна, из которых можно выбрать лучший, либо доработать его с учетом рекомендаций ИИ.

Помимо рассмотренных выше этапов в разработке интерфейсов с применением ИИ (обучение, интерпретация и генерация), в структуре данного процесса присутствуют два критически важных промежуточных этапа: аннотация и разметка данных и UX-прогноз. Хотя они часто остаются без внимания в получении финального результата, их роль фундаментальна для обеспечения точности и эффективности всей системы.

На этапе «аннотация и разметка данных» исходные визуальные и текстовые сведения (например, изображения интерфейсов, элементы UI, цветовые схемы, пользовательские сценарии и т. д.) структурируются и снабжаются метками. Этот процесс позволяет ИИ «понять», какие элементы присутствуют в дизайне, как они соотносятся друг с другом и какие функции выполняют. Полученные данные служат основой для обучения модели, давая ей возможность различать и классифицировать дизайнерские элементы по множеству параметров: цвет, размер, контекст использования, визуальная иерархия, психологическое воздействие и т. д. Без этого шага обучение ИИ было бы хаотичным и неструктурированным.

На этапе «UX-прогноз» ИИ моделирует поведение пользователя в зависимости от предлагаемых дизайнерских решений. Используя ранее собранные данные о реакциях пользователей, об их паттернах поведения, о времени взаимодействия с элементами интерфейса и уровне вовлеченности, система формирует предиктивную модель пользовательского опыта. Этот прогноз позволяет ИИ не просто генерировать визуально корректные решения, но и оценивать их потенциальную эффективность с точки зрения восприятия, удобства и соответствия задачам целевой аудитории. Иными словами, UX-прогноз – это механизм предугадывания того, насколько хорошо конечный пользователь поймет и примет предложенное цветовое и визуальное оформление.

Экспериментальное исследование авторского и генеративного дизайнов

Рассмотрим два варианта цветовых решений, принятых командой профессиональных UX/UI-дизайнеров при разработке интерфейса главной страницы официального сайта Альфа-Банка [11], и генеративного варианта, полученного искусственным интеллектом в рамках текстового prompt-запроса в Figma AI. Это позволит наглядно продемонстрировать, каким образом ИИ интерпретирует задачи визуальной коммуникации и насколько его результат отличается от решения, созданного человеком. Важно не только зафиксировать различия в цветах, но и оценить, как они влияют на эмоциональное восприятие, читаемость, структурную целостность интерфейса и общее удобство взаимодействия для пользователя.

Текстовый prompt в Figma AI имел следующий вид: «Измени цветовую схему главной страницы сайта Альфа-Банка РБ (<https://www.alfabank.by>), чтобы повысить доверие пользователей, снизить визуальный стресс и улучшить читаемость. Сделай дизайн более комфортным и интуитивно понятным, используя спокойные, сбалансированные цвета, соответствующие сфере финансов и онлайн-банкинга. Учитывай психологию восприятия: акцент на надежность, стабильность и доступность. Избегай агрессивных контрастов и чрезмерно ярких оттенков».

Цветовая палитра главной страницы сайта Альфа-Банка, представленная на рис. 1, является хорошим примером гармоничного сочетания функциональности и эстетики, где каждый оттенок играет свою роль в формировании восприятия информации пользователями.

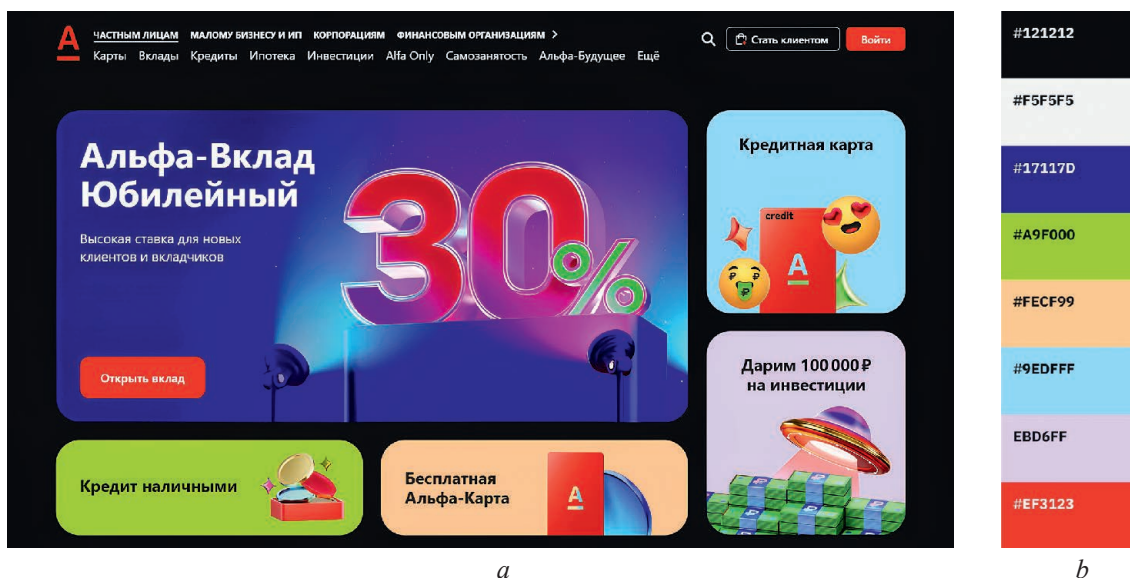


Рис. 1. Главная страница сайта Альфа-Банка (a) и его цветовая палитра (b)
Fig. 1. Main page of Alfa-Bank's website (a) and its color palette (b)

В целом палитра главной страницы, предложенная командой UX/UI-дизайнеров, представляет собой сбалансированное использование цветов, которое эффективно выполняет свою функцию в рамках интерфейса банка. Генеративный вариант дизайна главной страницы сайта Альфа-Банка, полученного в рамках текстового prompt-запроса в Figma AI, представлен на рис. 2.

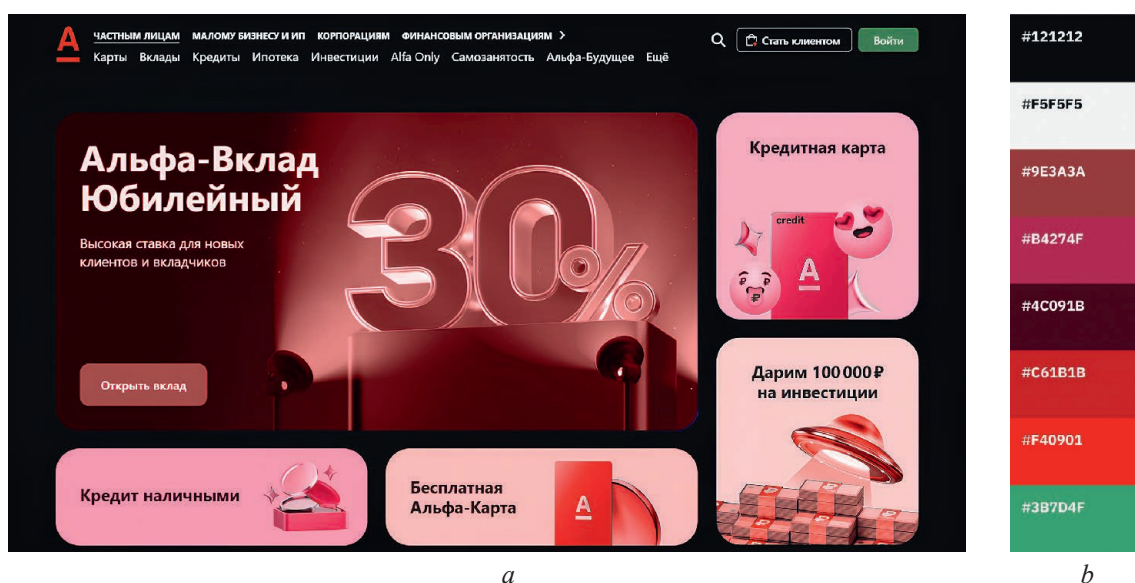


Рис. 2. Генеративный дизайн главной страницы сайта Альфа-Банка (a) и его цветовая палитра (b)
Fig. 2. Generative design of the Alfa-Bank website's main page (a) and its color palette (b)

Сохранение фона (#121212) и цвета текста (#F5F5F5) обеспечивает эффект глубины и сосредоточенности, однако изменение цвета инфокарточек приводит к изменению эмоциональной тональности. Вместо нейтральных и позитивно спокойных оттенков в них вводятся насыщенные красные и бордовые цвета:

#9E3A3A – глухой бордовый с коричневатым подтоном. Он создает ощущение надежности и устойчивости, хорошо балансирует темный фон, добавляя глубины и «веса» визуальной композиции;

#B4274F – выразительный малиновый, эмоциональный и энергичный. При сниженной прозрачности звучит мягче, оставаясь акцентным, но не агрессивным;

#4C091B – темный винный, почти чернильный. Визуально плотный, он усиливает ощущение приватности и важности, особенно в зонах с чувствительным контентом;

#C61B1B – классический красный с холодным подтоном. Это импульс, внимание, срочность, но в прозрачной версии – легкое подталкивание, а не тревога;

#F40901 – самый яркий алый. В чистом виде он агрессивен, но в 40–50 % прозрачности становится мягким маркером действия, привлекает взгляд, не перегружая восприятие.

При этом важно учесть, что эти цвета используются с пониженной непрозрачностью – порядка 40–50 %. Это художественное решение позволяет приглушить первоначальную агрессивность палитры, превращая сильные эмоциональные маркеры в более мягкие пастельные ноты, которые скорее вовлекают, чем пугают. Тем не менее даже при сниженной прозрачности эмоциональная нагрузка таких оттенков остается заметной и может не соответствовать целям цифрового банковского интерфейса.

Для многих пользователей важна не только визуальная выразительность, но и ощущение устойчивости, спокойствия и доверия, т. е. качеств, которые ассоциируются преимущественно с холодными или нейтральными цветами. В данном случае можно отметить некоторое стилистическое расхождение между изначальным смыслом текстового запроса и фактическим визуальным решением, предложенным Figma AI. Несмотря на формальную интерпретацию задач, алгоритм выбрал цвета, обладающие значительной психологической энергией, что потенциально может повлиять на поведение пользователя, в частности, вызвать зрительную усталость, затруднить восприятие информации или создать ощущение перегруженности.

Отдельного внимания заслуживают вопросы цветового баланса и контрастности в генеративной палитре. Цвета, подобные #B4274F и #F40901, обладая высокой насыщенностью, требуют точного размещения в визуальной иерархии. Если акцентные зоны избыточны по числу или не выстроены иерархически, пользователь теряет траекторию взгляда, перемещается хаотично и дольше ориентируется в структуре страницы. Это противоречит базовым принципам когнитивного UX-дизайна, где цвет должен быть вспомогательным, а не доминирующим инструментом управления вниманием.

Для оценки различий между палитрами был проведен сравнительный визуально-психологический анализ на основе следующих критериев: эмоциональная температура цветовой схемы, читаемость ключевых зон интерфейса, степень визуального стресса, восприятие навигационных маршрутов. В табл. 1 представлены обобщенные результаты данного анализа.

Таблица 1. Сравнительный визуально-психологический анализ для оценки различий между палитрами
Table 1. Comparative visual psychological analysis to assess differences between palettes

Критерий	Палитра	
	оригинальная	генеративная
Эмоциональная температура	Спокойная, уравновешенная	Энергичная, тревожная местами
Контраст СТА-элементов	Выразительный, но умеренный	Часто избыточный и агрессивный
Восприятие структуры интерфейса	Четкая иерархия	Нарушенное, смещенные акценты
Визуальная нагрузка	Низкая	Средне-высокая
Уровень доверия	Высокий	Средний

Помимо структурных и эмоциональных различий, важно учитывать также контекст использования банковского интерфейса. Пользователи заходят на сайт Альфа-Банка не ради развлечения, а с конкретной целью: получить информацию, выполнить операцию, проверить баланс. Цветовая схема в таком случае не должна конкурировать с контентом, а напротив, подчиняться ему, направлять внимание пользователя и облегчать выполнение задач. В оригинальной палитре именно так и происходит: визуальные акценты расставлены сдержанно, фон не отвлекает от основного текста, а цветовые маркеры (например, зеленый #A9F000 и красный #EF3123) применяются строго в функциональных зонах, таких как кнопки или уведомления. Это соответствует принципу «невидимого дизайна», когда интерфейс ощущается логичным и интуитивным, а не требует усилий для восприятия.

В то же время генеративный подход при всей выразительности рискует нарушить это равновесие. Избыточно яркие карточки, особенно в комбинации с глубоким фоном (#121212), могут приводить к визуальной конкуренции между фоновыми и передними слоями. У ряда пользователей это вызывает чувство усталости или даже тревожности, особенно если навигация сопровождается множественными красными и бордовыми акцентами, которые не несут однозначного

функционального значения. Более того, насыщенные оттенки часто воспринимаются как «сигнальные» и, если они используются без функциональной нагрузки, это снижает доверие и может провоцировать ощущение нестабильности.

Следует учитывать культурные и психологические ассоциации, возникающие при восприятии цвета. В постсоветском контексте винно-красные оттенки часто ассоциируются с тревогой и дефицитом, тогда как синие, серые и пастельные – с прозрачностью и надежностью. Поэтому генеративный дизайн может вызывать неосознанное напряжение, особенно нежелательное в банковской среде. Оригинальная палитра, напротив, сохраняет эмоциональное равновесие за счет предсказуемой цветовой логики и нейтрального фона.

Цветовая палитра напрямую влияет на микровзаимодействия, т. е. на наведение, клики, прокрутку. В оригинальной версии цвета четко разграничивают зоны действия и информации, повышая уверенность пользователя. Генеративный дизайн, напротив, из-за эмоциональной насыщенности может затруднять навигацию и вызывать неуверенность при выборе действия, что особенно важно для финансовых интерфейсов, где каждая ошибка критична.

Обсуждение результатов эксперимента

Генеративная палитра не просто эстетически отличается – она формирует иное пользовательское ожидание. Красные и бордовые тона в восприятии пользователя почти всегда связаны с эмоциями высокой интенсивности: страсть, решительность, срочность, мотивация к действию. Однако в банковской сфере такие ассоциации могут быть двусмысленными. С одной стороны, они действительно фокусируют внимание и могут повысить кликабельность определенных блоков – например, спецпредложений или персональных предложений по кредитам. С другой стороны, если эти цвета становятся преобладающими в информационном поле, пользователь может подсознательно считывать это как сигнал тревоги или давления, особенно если речь идет о финансовых решениях.

Особое внимание заслуживает также появление зеленого акцента (#3B7D4F) в зоне кнопок действия. Это интересный шаг, так как зеленый в контексте интерфейса всегда говорит о разрешении, одобрении, безопасности действия. На фоне доминирующих оттенков красного появление зеленого работает как визуальный якорь: он стабилизирует композицию, создает ассоциативный мостик с надежностью и направляет внимание пользователя туда, где нужно принять решение.

Именно в сравнении с оригинальной палитрой становится заметна концептуальная разница. Первая – про рациональность, структурность и визуальное спокойствие. Вторая – про акцент, привлечение внимания, эмоциональное вовлечение. С точки зрения UX/UI-дизайна, это не просто две палитры – это два подхода к коммуникации. Один подходит для базовой, ежедневной навигации, когда важна ясность и предсказуемость. Второй уместен в рамках динамичного пользовательского сценария, когда необходимо быстро захватить внимание или выделить особое предложение. Ни одна из палитр не является ошибочной, но обе задают разные темпоральные и психологические режимы взаимодействия.

При сравнении двух цветовых схем, оригинальной и генеративной, важный аспект – влияние цвета на визуальную усталость пользователя. Исследования, приведенные в [12, 13], показали, что красный цвет вызывает наибольшую визуальную усталость, в то время как более спокойные оттенки, такие как желтый или белый, оказывают меньшее воздействие на восприятие. В контексте сайта Альфа-Банка предложенная ИИ палитра с яркими красными оттенками (#F40901) может привести к снижению когнитивной производительности и повышенной усталости пользователей, что делает ее менее подходящей для долгосрочного использования в банковском интерфейсе, где важны комфорт и доверие. В то время как оригинальная схема с более мягкими и гармоничными цветами обеспечивает сбалансированное восприятие и минимизирует нагрузку на зрение, что делает ее более эффективной для обеспечения удобства и надежности взаимодействия с пользователем.

Кроме того, цвета ИИ-редизайна в предложенной комбинации не обеспечивают достаточного контраста и визуальной иерархии. Например, бордово-вишневые карточки с белым текстом могут терять читаемость на фоне темной базы (#121212), особенно у пользователей с пониженным восприятием цветов или в условиях плохой освещенности. Стандарты WCAG 2.1 требуют минимального коэффициента контраста 4.5:1 для основного текста, и не все сочетания новой палитры его соблюдают.

Для основной цифровой аудитории Альфа-Банка – пользователей в возрасте от 25 до 45 лет, привыкших к продуктам с высоким уровнем UX и визуального баланса, – оригинальная цветовая схема выглядит значительно более адаптированной. Темный фон (#121212) способствует снижению зрительной нагрузки, а мягкие пастельные акценты, такие как светло-желтый (#FECF99), голубой (#9EDFFF), лавандовый (#EBD6FF), поддерживают визуальный ритм и не мешают восприятию ключевых элементов.

Акцентные оттенки, например, красный #EF3123, размещены в интерфейсе строго в зоне действия (call-to-action), что создает четкий визуальный приоритет. Такое решение соответствует принципу F-сканирования взглядом и поддерживает модель предсказуемой навигации. В данном контексте акцент воспринимается не как раздражающий стимул, а как маркер следующего шага, улучшая поведенческую логику взаимодействия. Подобное цветовое поведение работает на уровне автоматических сценариев восприятия, снижая фрустрацию и повышая доверие к ресурсу.

Отдельного внимания заслуживают возрастные пользователи 55+, для которых вопрос визуального комфорта и когнитивной простоты становится особенно важным. Низкий контраст в ряде элементов генеративной палитры, таких как бордовые карточки с белым текстом (#9E3A3A + #F5F5F5), может затруднить восприятие информации при пониженном цветовом зрении или в условиях слабого освещения. Оригинальная схема, напротив, обеспечивает достаточный уровень контраста (в соответствии с WCAG 2.1), поддерживает четкую визуальную иерархию и тем самым демонстрирует универсальную адаптивность как для цифровой активной молодежи, так и для зрелых пользователей, предпочитающих спокойный и интуитивно понятный интерфейс.

Заключение

1. На основании проведенного сравнительного анализа можно заключить, что, несмотря на стремительное развитие технологий генеративного дизайна, искусственный интеллект все еще не способен в полной мере заменить человека на этапе принятия ключевых визуальных решений, особенно в контексте интерфейсов с высокой степенью ответственности. Предложенное искусственным интеллектом цветовое решение хотя и обладает эстетической выразительностью и нестандартностью, но демонстрирует ограниченность алгоритмического подхода в понимании глубинных поведенческих и психологических паттернов пользователей. Машинные модели склонны ориентироваться на формальные параметры визуальной гармонии, зачастую игнорируя критически важные аспекты – устойчивость восприятия, доверие, когнитивную нагрузку и культурную релевантность.

2. На данном этапе развития технологии искусственного интеллекта он может эффективно выступать в качестве вспомогательного инструмента – генерировать альтернативные варианты, ускорять процесс прототипирования и предлагать нестандартные решения. Однако окончательная ответственность за соответствие дизайна пользовательским ожиданиям и нормам восприятия все еще лежит на специалисте, обладающем не только техническими навыками, но и эмпатией, культурной интуицией и профессиональным опытом.

Список литературы

1. Унгер, Р. UX-дизайн. Практическое руководство по проектированию опыта взаимодействия / Р. Унгер, К. Чендлер; пер. с англ. СПб.–М.: Символ-Плюс, 2011.
2. Купер, А. Об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кохн; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Вильямс, 2014.
3. Lidwell, W. Universal Principles of Design / W. Lidwell, K. Holden, J. Butler. USA: Rockport Publishers, 2010.
4. Lynch, P. Web Style Guide: Basic Design Principles for Creating Web Sites / P. Lynch, S. Horton. London: Yale University Press, 2009.
5. Mahnke, F. H. Color, Environment, and Human Response / F. H. Mahnke. USA: John Wiley & Sons, 1996.
6. Tractinsky, N. Information Systems Evaluation in a Web Environment: The Impact of Aesthetics and Perceived Usability on User Satisfaction / N. Tractinsky, A. S. Katz, D. Ikar // MIS Quarterly. 2000. Vol. 24, No 2. P. 127–151.
7. Huang, W.-H. The Effect of Color on Online Shopping Behavior / W.-H. Huang, C.-H. Liao // International Journal of Electronic Commerce Studies. 2017. Vol. 8, No 2. P. 157–170.
8. Kaya, N. Relationship Between Color and Emotion: A Study of College Students / N. Kaya, H. H. Epps // College Student Journal. 2004. Vol. 38, No 3. P. 396–405.

9. Liu, Y. Exploring the Factors Associated with Web Site Success / Y. Liu, K. P. Arnett // Information & Management. 2000. Vol. 38, No 1. P. 23–33.
10. Figma Blog [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.figma.com/blog/introducing-figma-ai/#generate-designs-from-text-prompts>. Date of access: 27.10.2023.
11. Альфа-Банк [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.alfabank.by/>. Дата доступа: 27.10.2023.
12. Иванов, И. И. Нейропсихология и дизайн интерфейсов: теория и практика / И. И. Иванов, П. П. Петров. М.: Наука, 2020.
13. Иванов, А. Б. Влияние красного цвета на визуальную усталость: исследование в области нейропсихологии интерфейсов / А. Б. Иванов, Е. К. Смирнова // Sensors. 2024. Т. 24, № 4. С. 150–158.

Поступила 10.03.2025

Принята в печать 22.07.2025

References

1. Unger R., Chandler K. (2011) *A Project Guide to UX Design. For User Experience Designers in the Field or in the Making*. Saint Petersburg–Moscow, Symbol-Plus Publ. (in Russian).
2. Cooper A., Reiman R., Cohn D. (2014) *About Face. The Essentials of Interaction Design*. Moscow, Williams Publ.
3. Lidwell W., Holden K., Butler J. (2010) *Universal Principles of Design*. USA, Rockport Publ.
4. Lynch P., Horton S. (2009) *Web Style Guide: Basic Design Principles for Creating Web Sites*. London, Yale University Press Publ.
5. Mahnke F. H. (1996) *Color, Environment, and Human Response*. USA, John Wiley & Sons Publ.
6. Tractinsky N., Katz A. S., Ikar D. (2000) Information Systems Evaluation in a Web Environment: The Impact of Aesthetics and Perceived Usability on User Satisfaction. *MIS Quarterly*. 24 (2), 127–151.
7. Huang W.-H., Liao C.-H. (2017) The Effect of Color on Online Shopping Behavior. *International Journal of Electronic Commerce Studies*. 8 (2), 157–170.
8. Kaya N., Epps H. H. (2004) Relationship Between Color and Emotion: A Study of College Students. *College Student Journal*. 38 (3), 396–405.
9. Liu Y., Arnett K. P. (2000) Exploring the Factors Associated with Web Site Success. *Information & Management*. 38 (1), 23–33.
10. *Figma Blog*. Available: <https://www.figma.com/blog/introducing-figma-ai/#generate-designs-from-text-prompts> (Accessed 27 October 2023).
11. *Alfa-Bank*. Available: <https://www.alfabank.by/> (Accessed 27 October 2023) (in Russian).
12. Ivanov I. I., Petrov P. P. (2020) *Neuropsychology and Interface Design: Theory and Practice*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
13. Ivanov A. B., Smirnova E. K. (2024) The Effect of Red Color on Visual Fatigue: A Study in Neuropsychology of Interfaces. *Sensors*. 24 (4), 150–158 (in Russian).

Received: 10 March 2025

Accepted: 22 July 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пискун Е. С., канд. экон. наук, доц. каф. проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Максимчук У. А., студ., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 292-20-80
E-mail: espiskun@bsuir.by
Пискун Екатерина Сергеевна

Information about the authors

Piskun E. S., Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Maksimchuk U. A., Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 292-20-80
E-mail: espiskun@bsuir.by
Piskun Ekaterina Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-109-117>

UDC 004.896:004.942

DYNAMIC RELATIONAL GRAPH MODELING FOR MULTI-AGENT MOTION TRAJECTORY PREDICTION

YI TANG, DMITRY YU. PERTSAU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Accurate trajectory prediction of multiple agents is a critical task in the fields of autonomous driving, human-computer interaction, and behavior analysis. However, the dynamic and interactive nature of agent behavior poses significant challenges, since it requires the formation of complex spatio-temporal dependencies and dynamically evolving interactions between agents. A novel approach is proposed for modeling dynamic relational graphs, the core component of which is the attention focus block, taking into account the relative positions of graph-based agents. By considering objects in a scene (e.g., vehicles and road elements) as graph nodes and their interactions as edges, the proposed approach effectively captures both local and global dependencies in a scene and makes a prediction about the future trajectory. The presented approach is evaluated using the Argoverse1 trajectory prediction dataset. Experimental results show that this model outperforms existing methods.

Keywords: multi-agent trajectory prediction, graph neural network, attention block.

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

For citation. Yi Tang, Pertsau D. Yu. (2025) Dynamic Relational Graph Modeling for Multi-Agent Motion Trajectory Prediction. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 109–117. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-109-117>.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ГРАФОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ МНОГОАГЕНТНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

И. ТАН, Д. Ю. ПЕРЦЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Точное прогнозирование траектории движения нескольких агентов является важнейшей задачей в таких областях, как автономное вождение, взаимодействие человека с компьютером и анализ поведения. Однако динамичность и интерактивность поведения агентов создают значительные проблемы, поскольку требуют формирования сложных пространственно-временных зависимостей и динамически развивающегося взаимодействия между агентами. Предлагается новый подход для моделирования динамических реляционных графов, основным компонентом которых является блок акцента внимания с учетом относительного положения агентов на основе графов. Рассматривая объекты в сцене (например, транспортные средства и элементы дороги) как узлы графа, а их взаимодействие как ребра, предложенный подход эффективно отражает как локальные, так и глобальные зависимости на сцене и делает прогноз о будущей траектории. Представленный подход оценивается с помощью набора данных для прогнозирования траектории Argoverse1. Экспериментальные результаты показывают, что такая модель превосходит существующие методы.

Ключевые слова: многоагентное прогнозирование траектории, графовая нейронная сеть, механизм внимания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Тан, И. Динамическое графовое моделирование для многоагентного предсказания траектории движения / И. Тан, Д. Ю. Перцев // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 109–117. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-109-117>.

Introduction

The rapid advancement of autonomous driving technology is revolutionizing transportation systems, with trajectory prediction serving as a critical component to enhance both vehicle safety and driving efficiency. The goal of trajectory prediction is to accurately forecast the future behavior of traffic participants (e. g., vehicles, pedestrians, cyclists) [1]. This task is highly challenging due to the complex factors involved, including interactions between agents, motion dynamics, and constraints imposed by the map environment.

In the early stages of trajectory prediction research, traditional methods were typically based on vehicle dynamics models, utilizing historical states of agents (e. g., position, velocity, acceleration) to predict future motion trends. Methods such as Kalman Filters, Dynamic Bayesian Networks, and Hidden Markov Model demonstrated satisfactory performance in simple traffic scenario [2]. However, in more complex and dynamic traffic environments with multi-agent interactions, these traditional methods exhibited significant limitations in modeling intricate interaction relationships and capturing long-term dependencies.

With the emergence of deep learning, the field of trajectory prediction has undergone a paradigm shift. The integration of high-definition (HD) maps and sensor data introduced new perspectives for research. By combining map information with sensor data, researchers achieved significant improvements in prediction accuracy [3]. However, this also introduced challenges related to computational complexity and data fusion. Efficiently leveraging such heterogeneous data has become a core research question. Early studies often employed rasterized representations to convert HD maps into grid-like 2D images, enabling convolutional neural networks (CNNs) to extract spatial features. For instance, Casas et al. [4] utilized CNNs to extract road semantic features from rasterized maps, while Hong et al. [5] combined high-resolution 3D perception data with semantic maps to encode spatial characteristics. Although these rasterization-based methods effectively incorporated map data, their large perception range resulted in high computational costs and potential loss of critical map structural information, such as road topology and traffic constraints. To address these limitations, research has gradually shifted toward vectorized representations. These methods encode maps, agents, and other scene elements as vectorized features and leverage permutation-invariant operators, such as point cloud convolutions, graph convolutions, and transformers, to capture scene context. For example, VectorNet [6] as a pioneering work, modeled road maps and agent trajectories in a vectorized manner and utilized graph neural networks (GNNs) to capture interactions between agents, road environments, and other traffic participants. This approach improved the compactness and information retention of map representations, avoiding the information loss associated with rasterization. Building on this, LaneGCN [7] constructed a graph model based on road network topology, representing map elements as nodes and using GNNs to encode multi-level information, thereby explicitly modeling the local connectivity and global interaction relationships of road structures. HiVT [8] proposed a Hierarchical Vectorized Transformer to model multi-granularity interactions between agents.

Despite these advancements, most existing methods overly emphasize interactions between agents and map elements, while neglecting the potential relationships within agents or within map elements. These internal relationships, such as complex multi-agent interactions and internal structural associations of map elements, are crucial for comprehensively modeling the dynamic characteristics of traffic environments. Additionally, existing methods often struggle to effectively integrate local and global dependencies, leading to insufficient context capture.

To address these challenges, we propose a novel framework for Dynamic Relational Graph (DRG) modeling. This framework represents entities in the scene (e. g., vehicles and road elements) as nodes in a graph, with edges capturing their interactions, thereby effectively modeling both local and global dependencies within the scene. By incorporating relative positional information into a multi-head graph attention mechanism, the model efficiently captures spatio-temporal relationships in non-Euclidean feature spaces. This approach enables a more nuanced understanding of scene context and agent interactions, significantly improving trajectory prediction accuracy.

Problem statement

The trajectory prediction task aims to generate potential future trajectories for target agents based on their observed motion history and surrounding map information. Specifically, in a driving scenario

with N_a moving agents, we use M to represent the map information and $X = \{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_a}\}$ to denote the observed historical trajectories of all agents. For each agent i , its historical trajectory over the past H time steps are represented as $\mathbf{x}_i = \{\mathbf{x}_i^{-H+1}, \mathbf{x}_i^{-H+2}, \dots, \mathbf{x}_i^0\}$.

The multi-agent motion predictor generates potential future trajectories in future T time steps for all agents in the scene, denoted as $Y = \{\mathbf{y}_0, \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_{N_a}\}$. For each agent i , K possible future trajectories and their corresponding probability scores are predicted to capture the multimodal nature of motion. The predicted trajectories for agent i are represented as $\mathbf{y}_i = \{\mathbf{y}_i^1, \mathbf{y}_i^2, \dots, \mathbf{y}_i^K\}$, where each trajectory $\mathbf{y}_i^k = \{\mathbf{y}_{i,1}^k, \mathbf{y}_{i,2}^k, \dots, \mathbf{y}_{i,T}^k\}$ ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) represents the k^{th} predicted trajectory of the i^{th} agent over future T time steps. The associated probability scores for these trajectories are represented as $\mathbf{s}_i = \{s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^K\}$.

Method overview

This study proposes a trajectory prediction model based on relative positional feature fusion, leveraging a hierarchical network structure to learn and integrate various semantic relational features. As illustrated in Fig. 1, *a*, the proposed model comprises three primary components: intra-relational feature extraction, lane-actor fusion network, and multi-modal decoder.

We adopt a vectorized scene representation approach. As depicted in Fig. 1, *b*, the process includes scene vectorization and the computation of relative positions. Specifically, for each instance, such as trajectories and lane segments, a local reference frame is constructed to decouple the inherent features of the instances from their relative information. Following [9], a 5-dimensional relative positional vector $r_{i \rightarrow j} = [\sin(\alpha_{i \rightarrow j}), \cos(\alpha_{i \rightarrow j}), \sin(\beta_{i \rightarrow j}), \cos(\beta_{i \rightarrow j}), \|d_{i \rightarrow j}\|]$ between elements i and j is used to represent the spatial relationships between actors and actors, lanes and lanes, as well as actors and lanes in the scene, denoted as $r_{a \rightarrow a} \in \mathbb{R}^{N_A \times 5}$, $r_{l \rightarrow l} \in \mathbb{R}^{N_L \times 5}$ and $r_{a \rightarrow l} \in \mathbb{R}^{N \times 5}$, respectively. Here, $N = N_A + N_L$, N_A indicates the number of actors in the scene, and N_L represents the number of lane elements.

In the next step, the corresponding relative positional information is passed into their respective encoders to fuse and extract fundamental features x_A and x_L . Subsequently, these features, along with the relative positional information in the scene $r_{a \rightarrow b}$, are input into the feature fusion stage for comprehensive feature integration. Finally, the fused features are fed into the multi-modal decoder to forecast the trajectories of all target agents.

1. Intra-relational feature extraction

Following LaneGCN [7], our trajectory feature extraction module first employs a one-dimensional CNNs based Feature Pyramid Network (FPN) to encode the historical trajectories of vehicles within the scene denoted as X_A , thereby extracting fundamental features. The 1D CNNs effectively captures local patterns in the temporal dimension of the trajectories, such as acceleration, deceleration, or turning behaviors. Meanwhile, the FPN structure helps to address the diversity of trajectory lengths by extracting multi-scale features, enhancing the model's ability to represent both short and long trajectories. After initial encoding, to further capture the spatiotemporal dependencies of historical trajectories, we utilize a 4-layer Gated Recurrent Unit (GRU) network to process the encoded trajectory features and extract refined representations X_A^r . Compared to Long Short-Term Memory model, GRU offers a simpler structure and higher computational efficiency, making it particularly well-suited for trajectory modeling in complex scenarios. For extracting road features from map tensors, we leverage PointNet [10] to encode the lane nodes and structural information of the road network X_L , thereby obtaining fundamental lane features X_L^r . PointNet directly processes unstructured data points within lanes and effectively models both the local geometric features and the global topological structure of the lanes, which ensures the lane features incorporate critical configuration information, such as lane curvature, branching points, and connections between nodes. This process can be demonstrated in the following equations:

$$X_A^r = GRU^{(4)}(FPN_{1 \times 1}(X_A)); \quad (1)$$

$$X_L^r = PN(X_L), \quad (2)$$

where $FPN_{1 \times 1}$ refers to 1D CNNs based Feature Pyramid Network; $GRU^{(4)}$ indicates the four-layer GRU operation; PN corresponds to the PointNet network.

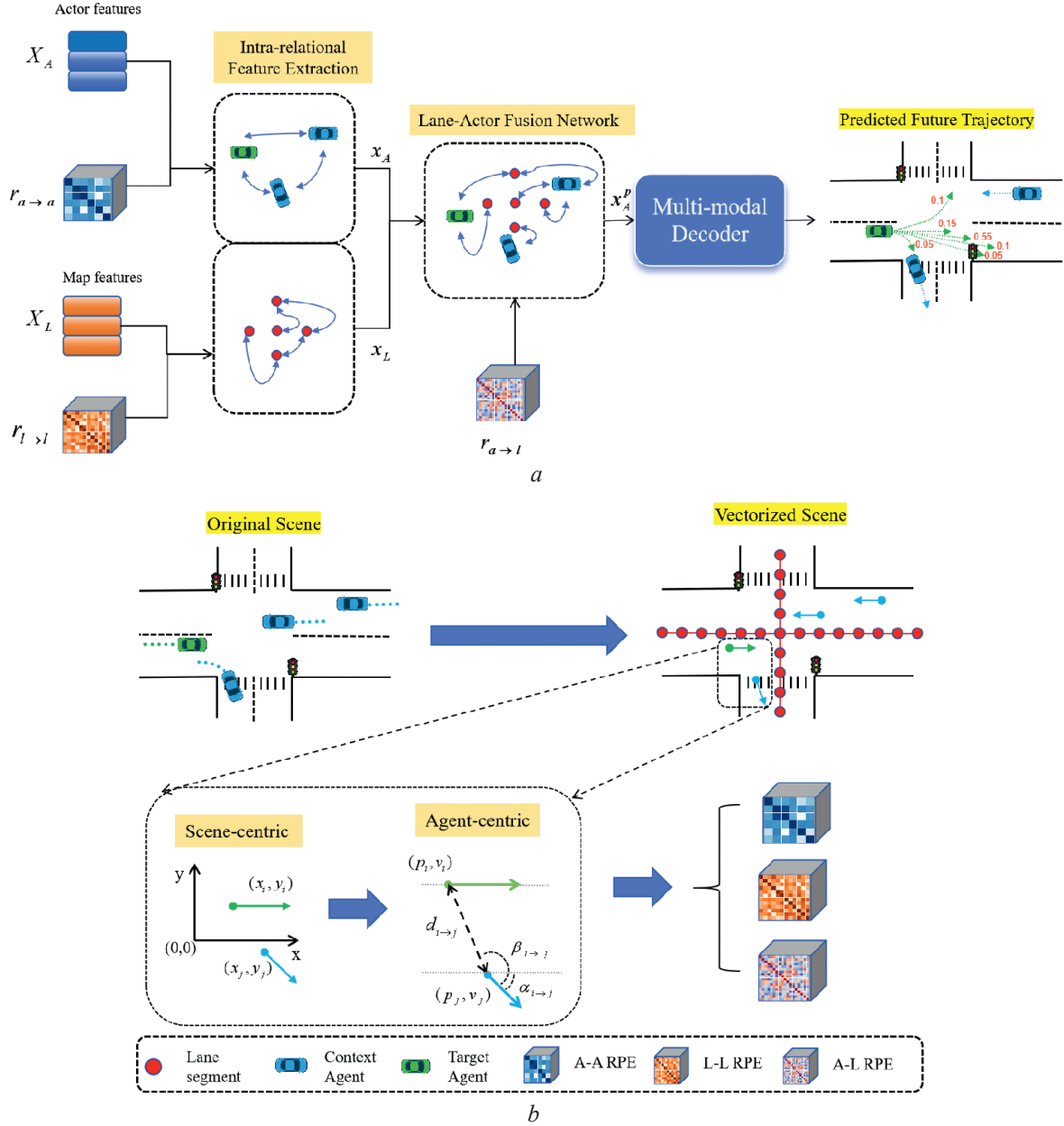


Fig. 1. Illustration of proposed DRG: *a* – architecture and flowchart of proposed model; *b* – scene vectorization and relative position calculation.

Although the aforementioned methods generate relatively rich features, existing approaches often directly utilize these features without explicitly modeling the latent relationships within actors (vehicles) or lanes. These internal relationships are crucial for accurately capturing multi-agent behavior interactions in complex scenarios. To address this limitation, we explicitly introduce relative positional information, which is paired with the corresponding actor or lane features and then fed into the Relative Position-aware Graph Attention Transformer (RP-GAT). Relative position explicitly represents the spatial positioning and semantic relationships between actors or between lanes, such as the relative distance and angles between vehicles, or the topological structure between lane nodes. Through the attention mechanism of RP-GAT, these features are further fused, resulting in more expressive actor and lane features, denoted as x_A and x_L , respectively:

$$\begin{cases} x_A = \xi^{(1)}(X_A^r, r_{a \rightarrow a}); \\ x_L = \xi^{(1)}(X_L^r, r_{l \rightarrow l}), \end{cases} \quad (3)$$

where $\xi^{(1)}$ is the one-time loop of RP-GAT module.

2. Feature fusion

At first, two separate linear layers are applied to further process the features of actors and lanes obtained from corresponding encoders. These processed features are then concatenated along the first dimension. Subsequently, the concatenated features, combined with the relative positional information of all elements in the scene, are fed into the RP-GAT to produce actor trajectory features that incorporate road element information. The specific details of RP-GAT are illustrated below in Fig. 2. The input features are first passed through three linear layers to obtain Q (Query matrix), K (Key matrix), and V (Value matrix), respectively. Multi-head attention is then applied to compute attention scores between these representations. To incorporate the corresponding relative positional information, the relative positional features are mapped to the same dimensional space through a linear layer and multiplied with the attention scores. This results in scores that comprehensively account for both feature interactions and positional relationships. Finally, a feedforward network further processes these scores through L times (here, L is 4). After each feedforward operation, the Add & Norm module is applied, where the input of the feedforward network is added back to its output, followed by layer normalization. This ensures better gradient flow during training and stabilizes the learning process. Thus obtain the final trajectory features for the actors denoted as x_A^p . The processes can be represented by the equation

$$x_A^p = \xi^{(4)}(MLP^{(2)}(x_A) \oplus MLP^{(2)}(x_L)), \quad (4)$$

where $MLP^{(2)}$ is the two sequential linear layers; $\oplus$ is the concatenate operation; $\xi^{(4)}$ is the four times loop of RP-GAT module.

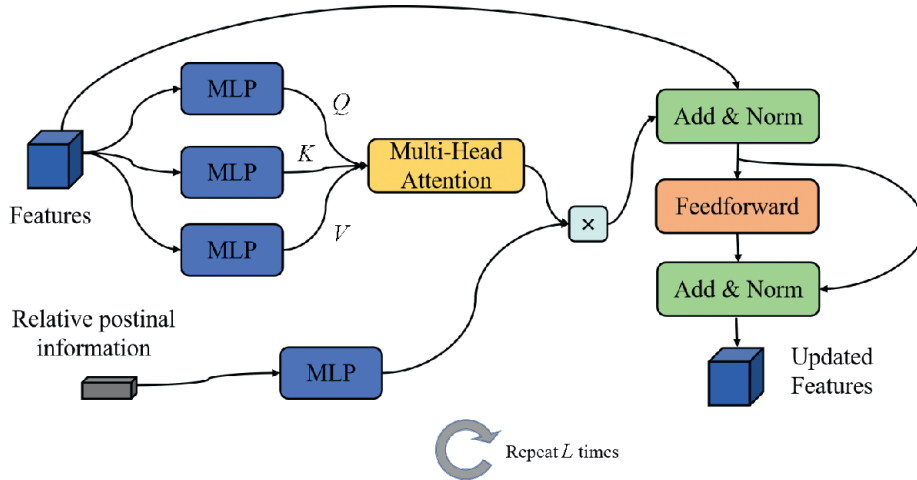


Fig. 2. Architecture of Relative Position-aware Graph Attention Transformer: MLP is the Linear layer with Layer Normalization and ReLU activation function; "×" is the matrix multiplication

3. Multi-modal decoder

During the trajectory generation process, we first utilize the fused actor trajectory features x_A^p to model multi-modal future trajectories at first. To generate K (in this case, $K = 6$) possible future trajectories, the model employs a multi-head attention mechanism to map the embedded features into multiple latent spaces, each corresponding to a distinct trajectory mode. The resulting embedding is denoted as E . This multi-head projection is implemented using two fully connected layers with non-linear activation functions. Then, the embedded vectors E are used to generate confidence scores S of each mode of each agent as well as predict the final K trajectories denoted as Y . Specifically, three sequential linear layers to generate the trajectories of each agent. To evaluate the confidence of each trajectory mode, the model applies three linear layers and a SoftMax function to generate confidence scores for K trajectories of each agent denoted as s . The processes are shown in equations:

$$\begin{cases} E = MLP^{(2)}(x_A^p); \\ Y = MLP^{(3)}(E); \\ S = \chi(MLP^{(3)}(E)), \end{cases} \quad (5)$$

where $MLP^{(3)}$ is the three sequential linear layers; χ is the SoftMax function.

When predicting future trajectories, directly regressing trajectory points $\mathbf{Y}$ often leads to physical inconsistencies, such as discontinuities between consecutive points, which deviate from the smoothness observed in real-world trajectories. To address these issues, we adopt a parameterization approach based on monomial basis functions for trajectory generation [9]. Specifically, the trajectory is represented as a polynomial expansion with respect to time t , expressed as $p(t) = \sum_{i=0}^n w_i t^i$, where $w_i \in \mathbb{R}^2$ are the polynomial coefficients that control the trajectory's shape, and n is the polynomial order. The n is configured as 5, consistent with the 5-second time horizon according to [11]. Here t is a normalized time variable that takes values between 0 and 1, corresponding to the evenly spaced time steps over the prediction horizon. The normalization ensures time remains relative and independent of scale. This polynomial-based approach leverages the higher-order differentiability of polynomials to inherently ensure the continuity and smoothness of the generated trajectories, effectively mitigating the physical inconsistencies often encountered in non-parametric prediction methods. Furthermore, this multimodal trajectory generation mechanism dynamically captures various plausible outcomes in complex traffic scenarios while assigning confidence levels to each predicted mode. This not only enhances the interpretability of the predictions but also improves their practical applicability in real-world settings. The detailed implementation can be found at <https://github.com/tjcbzd/DRG>.

Experiments and results

Dataset description. We train and test proposed model on Argoverse v1 Motion Prediction Dataset [11], it is a widely used benchmark designed to facilitate research in self-driving motion prediction. It provides high-quality trajectory data for agent vehicles along with semantically rich high-definition map information, enabling comprehensive spatiotemporal modeling. The dataset consists of 324.557 real-world driving scenarios collected from over 1.000 hours of driving in Pittsburgh and Miami. These scenarios are divided into training, validation, and test sets, containing 205.942, 39.472 and 78.143 samples, respectively. Each scenario spans five seconds, sampled at 10 Hz, with the first two seconds provided as historical trajectories of agent vehicles, requiring forecasting models to predict their movements for the subsequent three seconds [9]. The dataset includes both trajectory data and high-definition map elements such as lane centerlines with connectivity information, offering a realistic and challenging benchmark for trajectory prediction in complex urban driving environments.

Implementation details. We adopt a PolylineLR [7] scheduler to control the learning rate dynamically over 40 training epochs. The initial learning rate is set to 1.0e-4, and the values for learning rate adjustments are defined as [1.0e-4, 1.0e-3, 1.0e-3, 1.0e-4], corresponding to the milestones [0, 5, 35, 40]. At the beginning (epochs 0–5), the learning rate increases linearly from 1.0e-4 to 1.0e-3. Epochs 5–35, the learning rate remains constant at 1.0e-3 to ensure stable optimization in the main training phase. Finally, during epochs 35–40, the learning rate decays linearly back to 1.0e-4 to promote convergence. This dynamic scheduling strategy provides a warm-up period, a stable training phase, and a gradual learning rate reduction for smoother convergence. The model is trained on 2 RTX 3090 with a global batch size of 64. In addition, we consider only agents and lane segments within a 50-meter radius of focal agent.

Evaluation metrics. We have adopted the standard testing and evaluation methodology used in motion prediction competitions to assess prediction performance [7]. Key metrics for individual agents include Minimum Final Displacement Error (minFDE), Minimum Average Displacement Error (minADE) and Miss Rate (MR). Here MR measures the percentage of trajectories, where the distance between the predicted final position and the ground truth final position exceeds a predefined threshold d (here d is configured as 2). minFDE reflect the accuracy of the predicted endpoints, and minADE indicates the overall bias in the predicted trajectories. Calculations were carried out using the following formulas:

$$\min \text{ADE} = \frac{1}{T} \min_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \sum_{t=1}^T \sqrt{(\hat{x}_t^i - x_t)^2 + (\hat{y}_t^i - y_t)^2}; \quad (6)$$

$$\min \text{FDE} = \min_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \sqrt{(\hat{x}_T^i - x_T)^2 + (\hat{y}_T^i - y_T)^2}; \quad (7)$$

$$\text{MR} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbb{1} \left(\min_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \sqrt{(\hat{x}_T^i - x_T)^2 + (\hat{y}_T^i - y_T)^2} > d \right), \quad (8)$$

where $t \in [0, T]$, $\hat{x}_t, \hat{y}_t$ are the predicted points at time t ; $\hat{x}_T^i, \hat{y}_T^i$ are the predicted points of a positive trajectory (e. g. with minimal final displacement error) at time t ; N is the total number of all trajectory samples; $\mathbb{1}(\cdot)$ is a function that returns 1 if the condition in brackets is true and 0 otherwise.

Quantitative results. Tabl. 1 shows the comparisons with the state-of-the-art methods listed on the leaderboard of the Argoverse 1 motion Forecasting test set (the numbers highlighted in bold represent the best-performing results). Specifically, we compared several trajectory prediction models, including LaneGCN, DenseTNT, THOMAS, HiVT-128, GANet, SceneTrans, MacFormer, and proposed DRG model, evaluating their performance in terms of minFDE, minADE, MR, and model parameters (M). The evaluation focused on both single- and multi-modal trajectory prediction (K is 1 and 6 respectively).

Table 1. Comparisons with the state-of-the-art methods listed on the leaderboard of the Argoverse 1 motion Forecasting test set

Methods	minFDE		minADE		MR	Param/ M
	$K = 6$	$K = 1$	$K = 6$	$K = 1$	$K = 6$	
LaneGCN [7]	1.36	3.76	0.87	1.70	0.162	3.7
DenseTNT [12]	1.38	3.69	0.91	1.70	0.125	—
THOMAS [13]	1.44	3.69	0.94	1.67	0.104	—
HiVT-128 [8]	1.17	3.53	0.77	1.60	0.127	2.5
GANet [14]	1.16	3.46	0.81	1.59	0.118	2.4
SceneTrans [15]	1.24	4.57	0.80	1.75	0.126	15.3
MacFormer [16]	1.22	3.72	0.82	1.70	0.120	2.4
DRG (ours)	1.24	2.89	0.73	1.46	0.109	2.2

Experimental results demonstrate that our model achieves superior performance across multiple metrics, especially in multi-modal prediction ($K = 6$). Our model achieves a minADE of 0.73, outperforming all comparison models, including HiVT-128 (0.77) and GANet (0.81). In single-modal prediction ($K = 1$), our model achieves a minADE of 2.89, significantly better than other methods, such as GANet (3.46) and DenseTNT (3.69). These results indicate that our model not only exhibits higher accuracy in single trajectory prediction, but also excels in scenarios requiring the modeling of diverse potential trajectory distributions. By more accurately capturing the actual movement trends of the target, our model substantially reduces prediction errors in multi-modal scenarios. Furthermore, our model demonstrates strong performance in terms of miss rate (MR). In the multi-modal prediction task, the MR reduces to 0.109, one of the lowest values among all compared models. This significant reduction in miss rate highlights the model's higher confidence and robustness in predicting target trajectories, effectively reducing the instances of failed predictions. This improvement is particularly crucial in real-world applications, where safety is paramount, such as autonomous driving and robotic navigation, as it significantly enhances system reliability and stability. In addition to its prediction accuracy, our model exhibits an efficient lightweight design. With a parameter size of just 2.2M, it is significantly smaller than other high-performance models, such as SceneTrans (15.3M) and LaneGCN (3.7M). This compact design not only reduces storage and computational costs, but also improves operational speed and deployment efficiency in real-world applications.

Qualitative results. Trajectory predictions in four scenarios of varying complexity are illustrated in Fig. 3. The leftmost image and the bottom-middle image showcase the performance of our model in long-distance scenarios, where it provides accurate and precise trajectory predictions even over extended horizons. This robustness demonstrates the model's capability to maintain reliable predictions in situations, where long-term positional trends are critical. In the top-middle image, the scene features a highly complex and interactive intersection involving multiple agents. Our model successfully predicts trajectories for these agents under different intents, such as going straight or making turns, while maintaining robustness across all possible actions. The accurate handling of complex interactions between agents highlights the model's ability to navigate densely interactive environments with high

prediction confidence and minimal error. The rightmost image depicts a three-pronged intersection, where the intent of the vehicles is less clear. In this scenario, our model produces diverse and multimodal predictions, spreading the predicted trajectories across various potential outcomes. These predictions include not only straight-ahead motions, but also turning behaviors, all conditioned on the actual road topology and environment constraints. This capability of capturing trajectory uncertainty in ambiguous scenarios ensures that the model remains flexible and adaptive to diverse possibilities, further enhancing its practical utility.

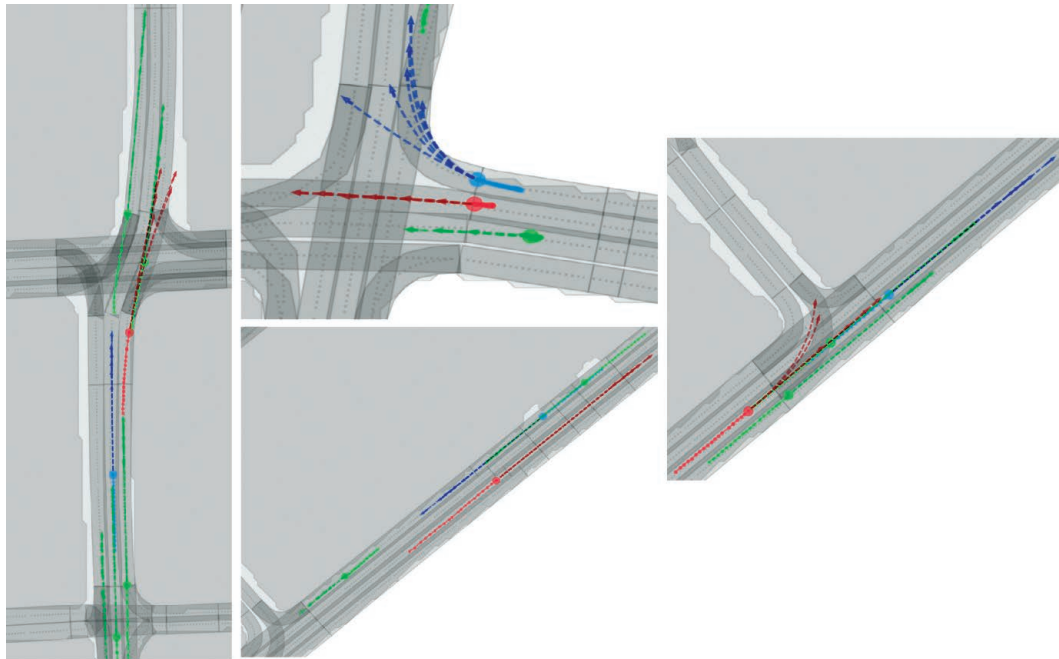


Fig. 3. Qualitative results on the test set of Argoverse1

Conclusion

1. A novel framework, Dynamic Relational Graph Modeling, for multi-agent trajectory prediction is proposed. The core component is the Relative Position-aware Graph Attention Transformer, which dynamically integrates graph attention mechanisms and spatiotemporal position encoding to model inter-agent dependencies with precision. Leveraging the modular nature of the transformer architecture, our framework is capable of capturing long-range interactions and enhancing multi-layer trajectory representations.

2. Experimental results on the Argoverse1 dataset show superior performance and interpretability in analyzing evolving inter-agent relationships. The ability to explicitly model dynamic relational structures positions our approach as an ideal tool for dynamic systems in real-world scenarios requiring fine-grained trajectory prediction, such as autonomous driving, human-computer interaction, and collaborative robotics. Future work will focus on extending hierarchical modeling, improving computational efficiency for real-time deployment, and validating robustness across diverse datasets.

3. The source code of the project has been published and is available for free non-commercial use: <https://github.com/tjycbzd/DRG>.

References

1. Yurtsever E., Lambert J., Carballo A., Takeda K. (2020) A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. *IEEE Access*. 8, 58443–58469.
2. Wang S., Bao Z., Culpepper J. S., Cong G. (2021) A Survey on Trajectory Data Management, Analytics, and Learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 54 (2), 1–36.
3. Singh A. (2023) Trajectory-Prediction with Vision: A Survey. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 3318–3323.
4. Casas S., Luo W., Urtasun R. (2018) IntentNet: Learning to Predict Intention from Raw Sensor Data. *In Proceedings of the Conference on Robot Learning. Zürich, Switzerland*. 947–956.

5. Hong J., Sapp B., Philbin J. (2019) Rules of the Road: Predicting Driving Behavior with a Convolutional Model of Semantic Interactions. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach, CA, USA.* 8454–8462.
6. Gao J., Sun C., Zhao H., Shen Y., Anguelov D., Li C., et al. (2020) VectorNet: Encoding HD Maps and Agent Dynamics from Vectorized Representation. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 11525–11533.
7. Liang M., Yang B., Hu R., Chen Y., Liao R., Feng S., et al. (2020) Learning Lane Graph Representations for Motion Forecasting. *In Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, Aug. 23–28, 2020, Proceedings, Part II. Springer International Publishing.* 541–556.
8. Zhou Z., Ye L., Wang J., Wu K., Lu K. (2022) HiVT: Hierarchical Vector Transformer for Multi-Agent Motion Prediction. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 8823–8833.
9. Zhang L., Li P., Liu S., Shen S. (2024) SIMPL: A Simple and Efficient Multi-Agent Motion Prediction Baseline for Autonomous Driving. *IEEE Robotics and Automation Letters.*
10. Qi C. R., Su H., Mo K., Guibas L. J. (2017) PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 652–660.
11. Chang M.-F., Lambert J., Sangkloy P., Singh J., Bak S., Hartnett A., et al. (2019) Argoverse: 3D Tracking and Forecasting with Rich Maps. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 8748–8757.
12. Gu J., Sun C., Zhao H. (2021) DenseTNT: End-to-End Trajectory Prediction from Dense Goal Sets. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision.* 15303–15312.
13. Gilles T., Sabatini S., Tsishkou D., Stanciulescu B., Moutarde F. (2022) THOMAS: Trajectory Heatmap Output with Learned Multi-Agent Sampling. *In International Conference on Learning Representations.*
14. Wang M., Zhu X., Yu C., Li W., Ma Y., Jin R., et al. (2023) GANet: Goal Area Network for Motion Forecasting. *In 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* 1609–1615.
15. Ngiam J., Vasudevan V., Caine B., Zhang Z., Chiang H. T. L., Ling J., et al. (2023) Scene Transformer: A Unified Architecture for Predicting Future Trajectories of Multiple Agents. *In International Conference on Learning Representations.*
16. Feng C., Zhou H., Lin H., Zhang Z., Xu Z., Zhang C., et al. (2023) MacFormer: Map-Agent Coupled Transformer for Real-Time and Robust Trajectory Prediction. *IEEE Robotics and Automation Letters.*

Received: 18 March 2025

Accepted: 22 July 2025

Author's contribution

Yi Tang conducted all aspects of the study independently, including task setting, sample preparation, plotting, and manuscript writing.

Pertsau D. Yu. provided essential assistance by thoroughly reviewing the manuscript, offering constructive feedback, and ensuring the accuracy and clarity of the content.

Information about the authors

Yi Tang, Postgraduate at the Department of Information Technologies in Automated Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Pertsau D. Yu., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Computer Science, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 764-41-91
E-mail: tangyijcb@163.com
Yi Tang

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ РАЗДЕЛА «СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ»

В помощь авторам при формировании литературных источников в разделе «Список литературы» предлагаем несколько примеров их оформления согласно Приложению 2 к Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации (ВАК) (тире, указанные в таблице Приложения 2 для оформления источников, не ставим).

1. Теория кодирования / Т. Касами [и др.]; пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006.
2. Галкин, Я. Д. Улучшенная модель двухзатворного JFET для аналоговых интегральных микросхем / Я. Д. Галкин, О. В. Дворников, В. А. Чеховский // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25>.
3. Hacker, P. S. Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns / P. S. Hacker, H. E. Schrank // IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine. 1982. Vol. AP-30, No 5. P. 956–966.
4. Авиационные правила организации и проведения летной проверки средств радиолокации, средств связи и радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации Республики Беларусь: пост. Мин-ва обороны Респ. Беларусь от 14.04.2017 № 7.
5. Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors / M. Chu [et al.] // npj. Digital Medicine. 2019. No 2. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Устройство для измерения активной и емкостной составляющих импеданса биологических тканей: пат. 2196504 Рос. Федерации, МПК А 61 В 5/053 / А. В. Ефремов, Р. Р. Ибрагимов, Р. А. Манвелиадзе, В. Т. Леонтьев, К. Г. Булатецкий, Г. Г. Колонда, Е. В. Тарасов, Р. Ш. Ибрагимов; Новосиб. гос. мед. акад., № 2000117324/14. Заявл. 28.06.2000. Оpubл. 20.01.2003.
7. Программная модель системы для анализа импедансометрических характеристик биологических жидкостей / К. Е. Мешкова [и др.] // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 93–97.
8. Измеритель иммитанса E7-20 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0>. Дата доступа: 07.05.2023.

Оформление не попавших в перечисленные выше примеры литературных источников смотрите в таблице Приложения 2 указанной инструкции.

При оформлении раздела **REFERENCES** в цитируемой публикации следует указывать ВСЕХ авторов (если их более 6-ти, то после 6-го ставить et al. – см. пример под цифрами 5, 6).

1. Kasami T., Tokura N., Iwadari E., Inagaki Ya. (2006) *Coding Theory*. Transl. from Japan by A.V. Kuznetsov. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
2. Galkin Y. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. (2022) Double Gate JFET Improved Model for Analog Integrated Circuits. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25> (in Russian).
3. Hacker P. S., Schrank H. E. (1982) Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns. *IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine*. AP-30 (5), 956–966.
4. Equipment and Radio Technical Support for State Aviation Flights of the Republic of Belarus. *Resolution of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus, Apr. 14 2017, No 7* (in Russian).
5. Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Hoang N. Pham, Bar-Yoseph R., et al. (2019) Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors. *npj Digital Medicine*. (2). <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Efremov A. V., Ibragimov R. R., Manveliadze R. A., Leontiev V. T., Bulatetsky K. G., Kolonda G. G., et al. (2003) Device for Measuring the Active and Capacitive Components of the Impedance of Biological Tissues. *Patent 2196504 Ros. Federation, IPC A 61 B 5/053. Novosibirsk State Medical Academy, No 2000117324/14. Stated 28.06.2000. Publ. 20.01.2003* (in Russian).
7. Meshkova K. E., Patseev S. V., Davydov M. V., Saveyko A. R., Pashkilevich V. V. (2022) A Software Model of a System for Analyzing the Impedance Characteristics of Biological Fluids. *Medelectronics–2022. Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 93–97 (in Russian).
8. *Immitance Meter E7-20*. Available: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0> (Accessed 7 May 2023) (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ФОРМУЛ

Настройки для набора формул в редакторе MathType

Define Styles

☐ Simple ☒ Advanced

Style	Font	Character Style	
		Bold	Italic
Text	Times New Roman	☐	☐
Function	Times New Roman	☐	☐
Variable	Times New Roman	☐	☒
L.C. Greek	Symbol	☐	☐
U.C. Greek	Symbol	☐	☐
Symbol	Symbol	☐	☐
Vector-Matrix . .	Times New Roman	☒	☐
Number	Times New Roman	☐	☐
Extra Math	MT Extra	☐	☐
User 1	Courier New	☐	☐
User 2	Times New Roman	☐	☐

Language/Keyboard:

Text style Any

Other styles Any

OK Cancel Help Apply Factory settings

☒ Use for new equations

Define Sizes

Full	11	pt
Subscript/Superscript	7	pt
Sub- Subscript/Superscript	5	pt
Symbol	17	pt
Sub-symbol	12	pt
User 1	75	%
User 2	150	%

OK Cancel Help Apply Factory settings

☒ Use for new equations

$$(1+B)^2 \sum_{p=1}^k x_{n_k}^{kp}$$

[illegible]