

ВЕСТНИК

Воронежского государственного технического университета



- **РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**
- **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**
- **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

**ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

ВЕСТНИК

**Воронежского государственного
технического университета**

Том 22 № 1 2026 г.

Основан в апреле 2000 г.

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в электронном каталоге Почты России - ПД033.

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит четыре раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь С.А. Малоюкова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211

Телефон: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2026

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration number PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription Index in the Electronic Catalogue of the Russian Post - ПД033.

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published four times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary S.A. Malyukova – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh Oblast, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 211

Phone number: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2026

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Интеллектуальный агент как компонент управления архитектурой распределенных сложных веб-приложений А.В. Пилецкая, С.П. Орлов	7
Определение дорожных препятствий и дефектов дорожного полотна при помощи модифицированного алгоритма DETR А.И. Паршин, А.В. Барабанов, М.Н. Аралов	13
К вопросу определения решения моделей транспортных задач открытого типа методом дифференциальных рент А.Н. Шелковой	19
Веб-приложение для анализа термодинамических циклов одноступенчатых холодильных машин К.Г. Королев, О.В. Калядин, А.В. Сергеев, М.А. Авдеев	28
Архитектура нейронной сети многофункционального агента на базе глубокого обучения с подкреплением В.В. Кашко, С.А. Олейникова	35
Структура персистентного хранения данных в метаграфовой СУБД Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов	45
Каскадно-селективная асинхронная модель на основе мультиагентных систем А.Л. Марыщенко, А.Д. Данилов	51
Идентификация тепловых сигнатур объектов на свободной поверхности пористой среды В.И. Ряжских, И.Г. Дроздов, В.А. Хвостов, Е.А. Соболева	56
Методы и алгоритмы машинного обучения в задаче оценки уровня артериального давления Э.А. Челышев, М.В. Раскатова	63
Увеличение точности детектирования и классификации объектов с использованием карт глубины и нейронных сетей глубокого обучения А.И. Паршин, В.Ф. Барабанов, М.А. Белых	69
Сравнительный анализ программных решений для мониторинга состояния вычислительных ресурсов организаций Х.М. Жуманиязов	75

Радиотехника и связь

Широкополосный пеленгационный комплекс на основе программно-определяемого радио Е.Д. Егорова, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, С.М. Фёдоров	82
Метод и алгоритм когнитивно-ресурсного синтеза радиосистемы передачи данных наблюдения с автономных беспилотных летательных аппаратов тактического звена И.Е. Мухин, И.Г. Бабанин, Е.Ю. Бабанина	93
Обнаружение слабых узкополосных сигналов на основе контроля интенсивности потока превышений порога спектральными отсчетами Д.А. Моисеев, А.Б. Токарев	106
Оценка параметров канала системы связи с OFDM при заранее известном количестве лучей и постоянстве задержек между ними А.А. Малютин, М.Д. Портниченко, А.Н. Зюзин	117

Исследование рабочих характеристик аппаратных кодеров на базе различных микропроцессоров методом нагрузочного тестирования А.Р. Рыжиков	128
Анализ характеристик антенных решеток разных конфигураций при реализации синфазного излучения Е.А. Ищенко, Е.Д. Егорова, А.Ю. Чернышев, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, И.А. Зеленин	135
Анализ гибридной радиооптической системы передачи с применением пространственно-временного кодирования Р.П. Краснов	141
Итеративный алгоритм полуслепой оценки многоантенного (MIMO) канала связи А.А. Малютин, М.Д. Портниченко, А.Н. Зюзин	149
Концептуальное проектирование распределенной стохастической антенной решетки на малых беспилотниках М.Д. Бавижев, А.А. Рахманов, Г.В. Слюсарев	159
Разработка и исследование системы тактильной векторной навигации на основе квадрополярного вибромоторного интерфейса О.Н. Чирков, А.П. Коробкин, М.С. Ковалев, В.А. Дарашкевичюс	169
Антенные решетки с механическим широкоугольным сканированием для аппаратуры передачи энцефалограмм и кардиограмм операторов Д.В. Журавлев, Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, Н.Б. Смольянов	177
Методика повышения точности расчёта индуктивных и ёмкостных характеристик печатных проводников радиоэлектронных устройств О.Н. Чирков, Д.В. Снигур	183

Машиностроение и машиноведение

Применение дисковых электродов-щеток для комбинированной обработки изделий со сложной геометрической формой О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, В.В. Куц	188
Двухслойная панель с гофровым наполнителем для самолётов М.В. Молод, В.И. Максименков	194
Моделирования магнитного поля при магнитном методе неразрушающего контроля зубьев зубчатого колеса Ю.В. Креселюк, В.А. Витренко	198
Механизм управления процессом отработки производственной технологичности для наукоемких изделий машиностроения В.П. Смоленцев, О.В. Уразов, В.Р. Петренко	205
Теплофизические процессы в термодинамической системе «инструмент-заточной круг» В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач	210

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

An intelligent agent as a component of the architecture managing for distributed complex web applications A.V. Piletskaya, S.P. Orlov.....	7
Determination of road obstacles and road defects using the modified DETR algorithm A.I. Parshin, A.V. Barabanov, M.N. Aralov.....	13
Some aspects of finding an optimal plan for open-type transport problems by the method of differential rents A.N. Shelkovoy.....	19
Web application for thermodynamic cycle analysis of single-stage refrigeration units K.G. Korolev, O.V. Kalyadin, A.V. Sergeev, M.A. Avdeev.....	28
Neural network architecture of a multifunctional agent based on deep reinforcement learning V.V. Kashko, S.A. Oleynikova.....	35
A method for persistent data storage in a meta graph database D.R. Nikolskiy, V.F. Barabanov.....	45
Cascade-selective asynchronous model based on multi-agent systems A.L. Maryshchenko, A.D. Danilov.....	51
Identification of thermal signatures of objects on the free surface of porous bodies V.I. Ryazhskikh, I.G. Drozdov, V.A. Khvostov, E.A. Soboleva.....	56
Machine learning methods and algorithms in the task of blood pressure estimation E.A. Chelyshev, M.V. Raskatova.....	63
Increasing the accuracy of object detection and classification using depth maps and deep learning neural networks A.I. Parshin, V.F. Barabanov, M.A. Belykh.....	69
Comparative analysis of software solutions for monitoring the state of computational resources in organizations Kh.M. Zhumaniiazov.....	75

Radio engineering and communication

Broadband direction finding system based on software-defined radio E.D. Egorova, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, S.M. Fedorov.....	82
Method and algorithm for cognitive-resource synthesis of a radio system for transmitting observation data from autonomous tactical-level unmanned aerial vehicles I.E. Mukhin, I.G. Babanin, E.Yu. Babanina.....	93
Detection of weak narrowband signals based on monitoring the intensity of threshold exceedances by spectral samples D.A. Moiseev, A.B. Tokarev.....	106
Estimation of the channel parameters of the OFDM communication system with a predetermined number of beams and constant delays between them A.A. Malyutin, M.D. Portnichenko, A.N. Zyuzin.....	117
Investigation of the performance characteristics of hardware encoders based on various microprocessors by load testing A.R. Ryzhikov.....	128

Analysis of the characteristics of antenna arrays of different configurations when implementing in-phase radiation E.A. Ishchenko, E.D. Egorova, A.Yu. Chernyshev, Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, I.A. Zelenin	135
Analysis of a hybrid radio-optical transmission system using spatial-time coding R.P. Krasnov	141
Iterative algorithm for semi-blind evaluation of a multi-antenna (MIMO) communication channel A.A. Malyutin, M.D. Portnichenko, A.N. Zyuzin	149
Conceptual design of a distributed stochastic antenna array on small unmanned aerial vehicles M.D. Bavizhev, A.A. Rakhmanov, G.V. Slyusarev	159
Development and research of a tactile vector navigation system based on a quadropolar vibration motor interface O.N. Chirkov, A.P. Korobkin, M.S. Kovalev, V.A. Darashkevicius	169
Antenna arrays with mechanical wide-angle scanning for equipment transmitting encephalograms and cardiograms of operators D.V. Zhuravlev, D.K. Proskurin, Yu.G. Pasternak, N.B. Smol'yanov	177
A technique for improving the accuracy of calculating the inductive and capacitive characteristics of printed conductors of electronic devices O.N. Chirkov, D.V. Snigur	183
Mechanical engineering and science of machines	
The use of disc brush-electrodes for combined processing of products with complex geometric shapes O.N. Kirillov, V.P. Smolentsev, V.V. Kuts	188
Double-layer panel with corrugated core for aircraft M.V. Molod, V.I. Maksimenkov	194
Simulation of the magnetic field using the magnetic method of non-destructive testing of gear teeth Yu.V. Kreselyuk, V.A. Vitrenko	198
Thermophysical processes in the thermodynamic system «tool-grinding wheel» V.P. Smolentsev, O.V. Urazov, V.R. Petrenko	205
Thermophysical processes in the thermodynamic system «tool-grinding wheel» V.I. Butenko, R.G. Kadach	210

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/1729-6501.2026.22.1.001
УДК 004.412

Интеллектуальный агент как компонент управления архитектурой распределенных сложных веб-приложений

А.В. Пилецкая, С.П. Орлов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Аннотация. Современные веб-приложения, особенно построенные по микросервисной архитектуре, характеризуются высокой степенью распределённости, динамичности и изменчивости. При масштабировании таких систем в виде комплекса взаимосвязанных приложений возрастают риски архитектурной деградации, усложняется поддержка целостности и нарушается согласованность между компонентами. В условиях постоянных изменений и быстрого цикла поставки (CI/CD) требуется подход к управлению архитектурой, который сочетает формализацию архитектурного состояния с возможностью адаптации в реальном времени. Предложена модель архитектурного управления, основанная на использовании интеллектуального программного агента, интегрированного в CI/CD конвейер. Интеллектуальный агент анализирует текущие архитектурные метрики, прогнозирует возможную деградацию систем и инициирует корректирующие действия, направленные на сохранение целостности архитектуры. Описание архитектурного состояния формализовано в виде вектора параметров, отражающих связность, масштабируемость, задержки, наличие антипаттернов и другие характеристики. В качестве модели интеллектуального агента использован многослойный перцептрон, обучаемый на исторических данных архитектурных трансформаций. Агент функционирует как промежуточное звено между системой мониторинга и управляющими компонентами инфраструктуры. Управляющие действия интеллектуального агента включают масштабирование сервисов, модификацию конфигураций, оптимизацию маршрутов обмена данными и другие меры. Проведено экспериментальное моделирование для набора микросервисов, демонстрирующее снижение уровня SLA-нарушений и повышение устойчивости системы. Предложенный подход показывает применимость в условиях DevOps и обеспечивает интеллектуальную адаптацию архитектурного состояния при эксплуатации комплекса сложных веб-приложений.

Ключевые слова: управление архитектурой программной системы; интеллектуальный агент; машинное обучение; распределённые веб-приложения; архитектурные метрики

Введение

Современные веб-приложения становятся всё более сложными, распределёнными и высоко динамичными системами, функционирующими в условиях постоянных изменений, высокой нагрузки и ускоренного жизненного цикла разработки. Особенно остро эта проблема проявляется при управлении не одним, а семейством взаимосвязанных веб-приложений, которые развиваются независимо, но должны сохранять архитектурную согласованность и устойчивость в рамках единой мета-архитектуры [1]. Возникает необходимость в системном управлении архитектурным состоянием, учитывающем множество факторов: от текущих метрик производительности до стратегических целей разработки [2].

Традиционные подходы к архитектурному управлению основаны на ручном анализе, фиксированных шаблонах проектирования и периодическом аудите. Однако в условиях непре-

рывной интеграции и развертывания приложений (CI/CD) [3, 4], а также частых изменений инфраструктуры, они оказываются недостаточно эффективными. Применительно к архитектурам веб-приложений такие подходы рассмотрены в [5, 6]. Управление архитектурой требует перехода к адаптивным методам, способным автоматически анализировать архитектурное состояние, прогнозировать риски деградации и вносить корректирующие изменения.

Современные тенденции связаны с использованием микросервисных архитектур при проектировании сложных веб-приложений [7]. В работах [8-10] рассмотрены методы повышения производительности веб-приложений, проектирования и оптимизации на основе гибких архитектур.

Целью настоящей работы является разработка и исследование модели интеллектуального агента, интегрированного в процесс архитектурного управления семейством распределённых веб-приложений. Агент функционирует на основе формализованных архитектурных метрик [11] и использует методы машинного обу-

чения для принятия решений в реальном времени. В рамках статьи предложен подход к формализации архитектурного состояния, описана структура агента, приведены сценарии его работы в пайплайне (конвейере) CI/CD и представлены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность подхода. Результаты работы могут быть использованы при построении интеллектуальных DevOps-систем нового поколения, функционирующих при меняющихся рабочих нагрузках.

Формализация архитектурного состояния

Управление архитектурой сложных веб-приложений, особенно в распределённой и многокомпонентной среде, требует формального описания текущего состояния системы и возможности его количественной оценки [12]. В рамках данной работы под архитектурным состоянием понимается совокупность параметров, отражающих структуру, взаимосвязи, устойчивость и поведение компонентов приложения. Для обеспечения управляемости и автоматизации архитектурных трансформаций необходимо выразить это состояние в форме, доступной для машинной обработки, анализа и прогнозирования.

Представим каждое отдельное веб-приложение A_i в множестве систем $F = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ как ориентированный граф $A_i = (C_i, E_i), i = 1..N$,

где C_i - множество компонентов сложного веб-приложения (сервисов, баз данных, API-шлюзов и т.п.),

$E_i \subseteq C_i \times C_i$ - множество дуг, соответствующих связям в системе (сетевые вызовы, очереди сообщений и т.п.).

Каждой дуге $e_{jk} \in E_i$ могут быть приписаны дополнительные параметры, например, время отклика, пропускная способность, стабильность соединения.

Для наблюдаемого момента времени t состояние всей архитектуры представляется в виде вектора метрик с размерностью K :

$$S_t = \{m_1(t), \dots, m_K(t)\}.$$

Типовые метрики архитектурного состояния представлены в табл. 1.

Изменения состояния во времени описываются функцией трансформации вектора:

$$S_{t+1} = T(S_t, \Delta),$$

где Δ - архитектурные события (изменение конфигурации, релиз новых компонентов, отказ узлов).

При этом важную роль играет предсказание нежелательных переходов, ведущих к деградации архитектуры. Например, резкое увеличение m_2 (задержек) при сохранении связности m_1 может сигнализировать о возможном сбое.

Таблица 1

Параметры архитектурного состояния

Метрика	Описание	Метод оценки
m_1	Связность архитектуры	Отношение числа связей в графе A_i архитектуры к максимально возможному
m_2	Средняя задержка межкомпонентных вызовов	Среднее по всем дугам $e_{jk} \in E_i$
m_3	Коэффициент дублирования компонентов	Сравнение дубликатов конфигураций и кода
m_4	Архитектурная энтропия (устойчивость к изменениям)	Взвешенный индекс за интервал времени

Формализованное представление архитектурного состояния позволяет:

- задавать пороговые значения метрики «Соглашение об уровне обслуживания» SLA,
- служит базой для формирования данных для описываемого далее интеллектуального агента,
- поддерживает автоматическое выявление аномалий и принятие решений.

Таким образом, векторное описание состояния является базисом для построения архитектурно-ориентированных механизмов управления и самообслуживания системы веб-приложения.

Архитектура интеллектуального агента

В условиях динамически изменяющегося архитектурного состояния систем ручное управление становится неэффективным и затратным. Для обеспечения адаптивности и устойчивости архитектуры предлагается использовать интеллектуальный агент (ИА), способный в автоматическом режиме анализировать текущее состояние, прогнозировать его изменения и инициировать корректирующие воздействия. Такой агент должен быть встроен в жизненный цикл CI/CD и выполнять функции наблюдения, анализа и активного управления архитектурой.

Интеллектуальный агент реализуется как автономный программный компонент, состоящий из следующих модулей, представленных в табл. 2.

Таблица 2
Модули интеллектуального агента

Модуль	Назначение
Мониторинг	Сбор архитектурных метрик и данных из CI/CD пайплайна
Анализ	Оценка текущего состояния S_t
Прогноз	Предсказание архитектурных изменений $S_{t+\Delta t}$
Принятие решений	Выработка управляющих воздействий на архитектуру
Исполнение	Передача команд в инфраструктуру

На вход ИА подаётся вектор архитектурного состояния S_t . Модель прогнозирования реализуется с помощью многослойного перцептрона (MPL): $f = S_t \rightarrow \hat{S}_{t+\Delta t}$, где $\hat{S}_{t+\Delta t}$ – предсказанное состояние, полученное после анализа динамики изменений. Основной задачей агента является оценка риска ухудшения архитектурного качества, выявляемого через увеличение значений определённых метрик. На основе предсказания выполняется выбор управляющего воздействия: $g(\hat{S}_{t+\Delta t}) \rightarrow AT_k$, где AT_k – одна из возможных архитектурных трансформаций:

- масштабирование компонентов;
- перераспределение нагрузки;
- перезапуск или откат релиза;
- изменение конфигурации взаимодействия.

Решение принимается на основе сравнения предсказанного состояния с допустимыми порогами и шаблонными архитектурными паттернами.

Агент встраивается в этап между доставкой кода и развёртыванием инфраструктуры. Модель перцептрона обучается на основе исторических данных: журналов метрик, архитектурных инцидентов, успешных и неудачных корректирующих действий. В процессе эксплуатации агент продолжает самообучение, корректируя веса модели на основе результатов своих действий. Это делает систему способной к долговременной адаптации и улучшения качества управления.

Интеграция интеллектуального агента в процесс CI/CD

Интеграция интеллектуального агента в конвейер CI/CD позволяет не только отслежи-

вать изменения в архитектуре в режиме реального времени, но и оперативно реагировать на них до того, как они приведут к деградации системы. Такой подход трансформирует архитектурное управление из реактивного процесса в проактивную, интеллектуально поддерживаемую деятельность.

ИА подключается на этапе между развёртыванием и запуском в продуктивную среду. ИА перехватывает информацию о текущем состоянии системы, сверяет её с допустимыми значениями и может либо утвердить развёртывание, либо модифицировать его. Интеллектуальный агент получает информацию из следующих источников:

- CI/CD pipeline: стадии сборки, тестирования, публикации артефактов;
- Мониторинг: Prometheus, Grafana (текущие и агрегированные метрики);
- Git: анализ изменений в конфигурациях и архитектурных шаблонах;

Управляющие воздействия направляются в модули:

- Helm (изменение chart'ов);
- Kubernetes API (scale, delete, patch, rollout restart);
- GitOps pipeline (Pull Request с архитектурным предложением).

Примеры использования интеллектуального агента приведены в табл. 3.

Таблица 3
Реагирование ИА на различные сценарии

Сценарий	Реакция агента
Увеличение latency между компонентами > 300мс	Масштабирование узла с наибольшей нагрузкой
Рост ошибок 5xx после деплоя	Инициирование отката на предыдущую версию
Возникновение дублирующего сервиса (антипаттерн)	Генерация предложения архитектурного объединения через Git
Нарушение связности	Перезапуск проблемного компонента, переключение маршрута на другую реплику

Преимуществами интеграции ИА является автоматизация архитектурного контроля - система самостоятельно отслеживает и корректирует отклонения; снижение времени реагирования: устранение проблем без участия инженеров; повышение устойчивости: за счёт прогнозирования архитектурной деградации.

Экспериментальное исследование

Для оценки эффективности предложенного интеллектуального агента управления архитектурой было проведено экспериментальное моделирование в среде, приближённой к реальной DevOps-инфраструктуре. Целью эксперимента было сравнение показателей устойчивости, скорости реакции и архитектурной целостности в двух режимах: с интеллектуальным агентом и без него (ручное управление). Среда моделирования состоит из следующих компонент:

- 5 микросервисов, реализующих типичную бизнес-логику (аутентификация, каталог, заказы, платежи, логирование);
- Kubernetes-кластер с автоскейлингом;
- Мониторинг через Grafana;
- CI/CD — GitLab;
- Архитектурное состояние отслеживается по 4 метрикам - m_1, m_2, m_3, m_4 , которые были описаны в табл. 1.

В течение 48 часов моделировались следующие сценарии:

- 1) значительный и быстрый рост нагрузки на компонент заказа;
- 2) задержка между аутентификацией и каталогом;

3) отказ логирования (ошибка 5xx на все запросы к сайту);

4) ошибочный запрос Pull Request, нарушающий шаблон архитектуры.

В одном режиме интеллектуальный агент был отключён, и решения принимались вручную по сигналам мониторинга. В другом режиме - агент работал в активном режиме: анализировал архитектурное состояние, прогнозировал нарушения и управлял необходимыми реакциями (масштабирование, откат, патчинг).

Результаты эксперимента приведены в табл. 4 и на рис. 1.

Таблица 4

Сводная таблица метрик с участием обучающего интеллектуального агента

Метрика	Без ИА	ИА	Улучшение
Среднее время Реагирования (сек.)	184	43	x4.3
SLA-нарушения за период (%)	19.5	6.8	x2.8
Количество ручных вмешательств	11	2	x5.5
Средняя связность архитектуры m_1	8	2	x4

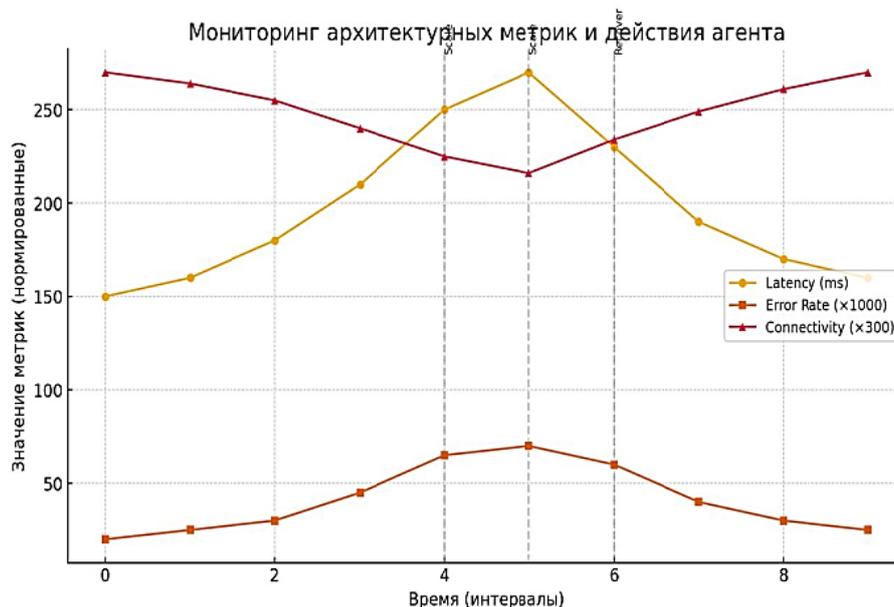


Рис. 1. Иллюстрация действий интеллектуального агента архитектурного управления

Таким образом, ИА выполняет не только поддерживающую, но и профилактическую функцию в архитектуре распределённых систем.

Разработанный интеллектуальный агент реализует непрерывный цикл «наблюдение →

прогноз → решение», используя данные мониторинга и методы машинного обучения для оценки текущего состояния и предсказания архитектурной деградации. Его встраивание в пайплайн CI/CD позволяет не только отслеживать изменения в архитектуре, но и проактивно

инициировать корректирующие действия — такие как масштабирование, откат, реструктуризация конфигураций.

Заключение

В статье получены следующие результаты.

1. Предложен формальный подход к архитектурному управлению комплексом сложных распределённых веб-приложений с использованием интеллектуального агента, интегрированного в процесс CI/CD.

2. Разработана формальная модель архитектурного состояния системы в виде вектора метрик, отражающих ключевые параметры связности, устойчивости и производительности архитектуры.

3. Разработан и обоснован цикл работы интеллектуального агента «наблюдение → прогноз → решение», использующий данные мониторинга и методы машинного обучения для оценки текущего состояния и предсказания архитектурной деградации. Его встраивание в пайплайн CI/CD позволяет не только отслеживать изменения в архитектуре, но и проактивно инициировать корректирующие действия — такие, как масштабирование, откат и др.

4. Экспериментально подтверждено влияние интеллектуального агента на качество архитектурного управления. Показано, что использование интеллектуального агента обеспечивает:

- а) снижение среднего времени реагирования на архитектурные инциденты более чем в 4 раза;
- б) уменьшение количества SLA-нарушений в 2,5–3 раза;
- в) повышение структурной связности и устойчивости архитектуры в динамически меняющейся среде;
- г) адаптивность архитектуры при изменении нагрузки.

Таким образом, интеллектуальный агент является перспективным инструментом архитектурного управления в условиях высокой на-

грузки, частых изменений и масштабирования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных DevOps-платформ, а также как основа для автоматизации архитектурных решений в сложных IT-экосистемах.

Литература

1. Басс Л., Клементс П., Казман Р. Архитектура программных систем: тактика и шаблоны. СПб.: Питер, 2020. 432 с.
2. Willard J., Hutson J. Evolution and Future of AI-Driven Microservices Architecture // *International Journal of Modern Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 16–22.
3. Mahant R., Bhatnagar S. Enhancing Decision-Making Capabilities and Autonomy: Integrating Machine Learning into Microservice Architectures // *Machine Intelligence Research*. 2024. Vol. 18. No. 1. P. 716–736.
4. Sai Tarun Kaniganti, Venkata Naga Sai Kiran Challa. Leveraging Microservices Architecture with AI and ML for Intelligent Applications // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2020. No. 11 (12). P. 3726–3750.
5. Wagner J. *Web Performance in Action: Building Fast Web Pages*. Manning Publications, 2017. 376 p.
6. Павлидис В.Д., Бражникова А.Н. Современные архитектуры построения web-приложений // *Наукоосфера*. 2025. № 3-2. С. 47-52.
7. Taibi D., Lenarduzzi V., Pahl C. Architectural Patterns for Improving Microservice-Based Web Applications // *IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA)*. 2018. P.1-10.
8. Ghasemi F., Mosleh M. Adaptive Load Balancing to Improve Performance in Distributed Web Applications // *Journal of Systems and Software*. 2023. Vol. 195, 111567.
9. Newman S. *Building Evolutionary Architectures for Large-Scale Web Systems*. O'Reilly Media, 2020. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/building-evolutionary-architectures/9781492043437/> (дата обращения: 15.11.2025).
10. Логинова Н.В. Методы оптимизации производительности web-приложений // *Наука и образование сегодня*. 2024. № 1 (78). С. 1-6.
11. Orozco C.E., Pardo C., Monsalve E.S. Towards a metrics model for DevOps adoption: Case study of an enterprise application // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2025. No. 3(1). P. 157-194.
12. Пилецкая А.В., Орлов С.П. Модель машинного обучения при анализе угроз в композитной архитектуре безопасности // *Безопасность цифровых технологий*. 2024. № 4 (115). С. 9-24.

Поступила 16.09.2025; принята к публикации 20.01.2026

Информация об авторах

Пилецкая Антонина Валерьевна – аспирант, Самарский государственный технический университет (443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: piletskaya.tonya@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4970-6680

Орлов Сергей Павлович – д-р техн. наук, профессор, Самарский государственный технический университет (443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: orlovsp1946@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0009-9456

An intelligent agent as a component of the architecture managing for distributed complex web applications

A.V. Piletskaya, S.P. Orlov

Samara State Technical University, Samara, Russia

Abstract. Modern web applications, especially those built on a microservice architecture, are characterized by a high degree of distribution, dynamism, and variability. When scaling such systems as a complex of interconnected applications, the risks of architectural degradation increase, the support of integrity becomes more complex, and the consistency between components is compromised. In the context of constant changes and a fast delivery cycle (CI/CD), an approach to architecture management is required that combines the formalization of architectural state with the ability to adapt in real-time. This article proposes an architectural management model based on the use of an intelligent software agent integrated into the CI/CD pipeline. The intelligent agent analyzes current architectural metrics, predicts possible degradation of systems, and initiates corrective actions aimed at preserving the integrity of the architecture. We described the architectural state using a vector of parameters that reflect. We formalized the description of the architectural state as a vector of parameters that reflect connectivity, scalability, delays, the presence of anti-patterns, and other characteristics. We used a multilayer perceptron trained on historical data of architectural transformations as a model of an intelligent agent. The intelligent agent functions as an intermediary between the monitoring system and the infrastructure's control components. The control actions of an intelligent agent include scaling services, modifying configurations, optimizing data exchange routes, and other measures. We conducted experimental modeling for a set of microservices, demonstrating a decrease in the level of SLA violations and an increase in system stability. The proposed approach shows applicability in DevOps environments and provides intelligent adaptation of the architectural state during the operation of complex web application.

Key words: software system architecture management; intelligent agent; architectural management; machine learning; distributed web applications; architectural metrics

References

1. Bass L., Clements P., Kazman R. "Software system architecture: tactics and patterns". St. Petersburg: Piter, 2020, 432 p.
2. Willard J., Hutson J. "Evolution and future of AI-driven microservices architecture", *International Journal of Modern Engineering Sciences*, 2025, vol. 12, no. 1, pp. 16–22.
3. Mahant R., Bhatnagar S. "Enhancing decision-making capabilities and autonomy: integrating machine learning into microservice architectures". *Machine Intelligence Research*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 716–736.
4. Sai Tarun Kaniganti, Venkata Naga Sai Kiran Challa "Leveraging microservices architecture with AI and ML for intelligent applications", *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, 2020, no.11(12), pp. 3726–3750.
5. Wagner J. "Web performance in action: building fast web pages", Manning Publications, 2017, 376 p.
6. Pavlidis V.D., Brazhnikova A.N. "Modern architectures for building web applications", *Scientific Sphere (Naukosfera)*, 2025, no. 3-2, pp. 47-52.
7. Taibi D., Lenarduzzi V., Pahl C. "Architectural patterns for improving microservice-based web applications", *IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 2018, pp.1-10.
8. Ghasemi F., Mosleh M. "Adaptive load balancing to improve performance in distributed web applications", *Journal of Systems and Software*, 2023, vol. 195, 111567.
9. Newman S. "Building evolutionary architectures for large-scale web systems", O'Reilly Media, 2020, available at: <https://www.oreilly.com/library/view/building-evolutionary-architectures/9781492043437/> (date of access: 15.11.2025).
10. Loginova N.V. "Methods for optimizing web application performance", *Science and Education Today (Nauka i obrazovanie segodnia)*, 2024, no. 1 (78), pp. 1-6.
11. Orozco C.E., Pardo C., Monsalve E.S. "Towards a metrics model for DevOps adoption: Case study of an enterprise application", *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 2025, no. 13(1), pp. 157-194.
12. Piletskaya A.V., Orlov S.P. "Machine learning model for threat analysis in composite security architecture", *Digital Technology Security (Bezopasnost' tsyfrovyykh tekhnologiy)*, 2024, no. 4 (115), pp. 9-24.

Submitted 16.09.2025; revised 20.01.2026

Information about the authors

Antonina V. Piletskaya, postgraduate student, Samara State Technical University (244 Molodogvardeyskaya str., Samara 443100, Russia), e-mail: piletskaya.tonya@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4970-6680

Sergey P. Orlov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Samara State Technical University (244 Molodogvardeyskaya str., Samara 443100, Russia), e-mail: orlovsp1946@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0009-9456

Определение дорожных препятствий и дефектов дорожного полотна при помощи модифицированного алгоритма DETR

А.И. Паршин, А.В. Барабанов, М.Н. Аралов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Представлена система определения дефектов дорожного полотна и препятствий на дороге, требующих внимания водителя, с использованием предобученных нейронных сетей, основанных на модифицированном алгоритме Detection Transformer (DETR) с измененным механизмом внимания на основе алгоритма адаптивного смешивания. Классический алгоритм отличается высокой точностью детектирования и классификации объектов на изображении. Предлагаемая модификация основывается на необходимости увеличения точности работы алгоритма DETR при уменьшении требуемых для работы вычислительных ресурсов. Описан подход распознавания объектов с использованием глубокого машинного обучения, в котором применяется дообучение нейронной сети. Также разработан алгоритм идентификации дефектов дорожного покрытия. Приводятся результаты тестирования на различных наборах данных, представляющих изображения дороги с различными дефектами или препятствиями. Набор был получен при помощи камеры, установленной на автомобиль, делающий снимки в разрешении 1920×1080 , после чего изображения приводились к разрешению в 1333 пикселей по большей стороне. В заключении производится сравнение результатов работы классического и модифицированного алгоритмов DETR по следующим характеристикам: точность, время обучения и время обработки одного изображения.

Ключевые слова: распознавание объектов; искусственная нейронная сеть; анализ изображений; Detection Transformer (DETR); сверточная нейронная сеть

Введение

В статье рассмотрен подход к детектированию и классификации дефектов дорожного полотна и препятствий на дороге с помощью модифицированного алгоритма DETR.

Алгоритм DETR, представленный в 2020 году [1], обладает высокой точностью детектирования и классификации объектов на изображении и значительно превосходит классические алгоритмы. Основной идеей алгоритма является использование механизма трансформера для определения связи между различными частями изображения.

Упрощенно, алгоритм состоит из входной сверточной нейронной сети и механизма внимания. Сверточная нейронная сеть формирует первичные признаки для разных частей изображения, механизм внимания ищет зависимости между этими признаками. Использование такого подхода позволяет существенно увеличить точность детектирования и классификации объектов.

Однако этот алгоритм обладает и рядом недостатков, самым важным из которых является поиск зависимости между признаками в механизме внимания – для каждого признака алгоритм пытается подобрать наилучший коэффициент связи с другими признаками, при-

водящий к росту точности итогового предсказания. Все это приводит к квадратичной зависимости количества подбираемых коэффициентов от размеров входного изображения, что существенно увеличивает время обучения и вычислительные ресурсы. Это особенно заметно при использовании качественных входных изображений высокого разрешения.

Таким образом, остро встает необходимость модификации алгоритма DETR для уменьшения вычислительных ресурсов и времени обучения.

Модификация алгоритма DETR для уменьшения вычислительных ресурсов

Модифицированный алгоритм DETR состоит из входной сверточной нейронной сети, модифицированного механизма внимания, трансформер-энкодера, трансформер-декодера и сети окончного предсказания [2]. На рис. 1 представлена модифицированная структура алгоритма.

В качестве входной сверточной нейронной сети выбрана сеть ResNet-101[3]. Нейронная сеть ResNet (можно перевести как сеть с остатком или остаточная сеть) – это архитектура глубокого обучения, в которой весовые слои обучаются остаточным функциям по отношению к входам слоев [4].

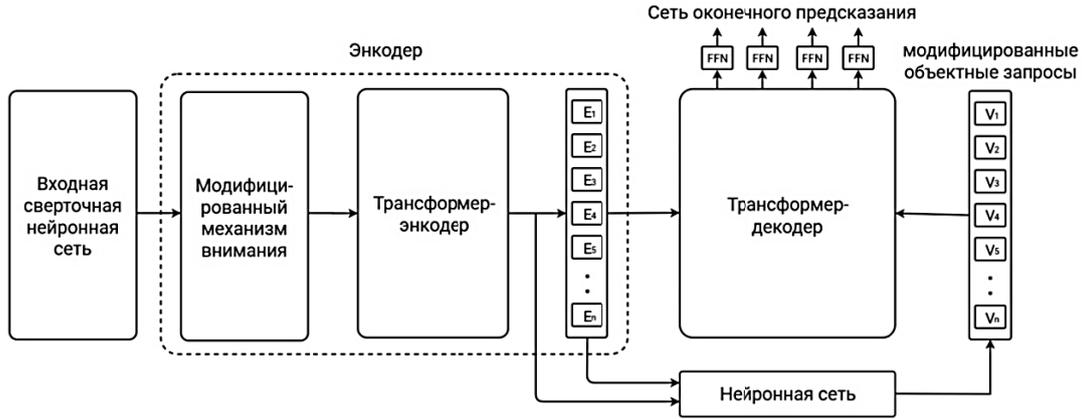


Рис. 1. Структурная схема алгоритма детектирования и классификации

Основным элементом ResNet является остаточный блок, применяющий соединение быстрого доступа, через которое данные проходят без изменений (рис. 2).

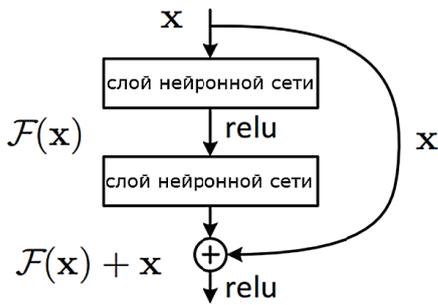


Рис. 2. Схема остаточного блока сети ResNet

Данный блок состоит из нескольких слоев сверточной нейронной сети, преобразующих входной сигнал x в выходной сигнал y в соответствии с формулой:

$$y = F(x) + x. \quad (1)$$

В результате использования такой архитектуры остаточный блок запоминает отличие входного сигнала x от $F(x)$.

Это означает, что при дальнейшем обучении, если на определенном уровне нейронная сеть успешно аппроксимировала целевую функцию, веса последующих слоев в остаточных блоках стремятся к нулю, что приводит к незначительным изменениям сигнала либо отсутствию изменений вовсе. Как следствие – использование остаточного блока позволяет сети регулировать собственную глубину в зависимости от сложности решаемой задачи.

За счет использования такой архитектуры, сеть ResNet имеет более высокую точность в сравнении с классическими сверточными нейронными сетями при одинаковом количестве слоев (рис. 3) [5].

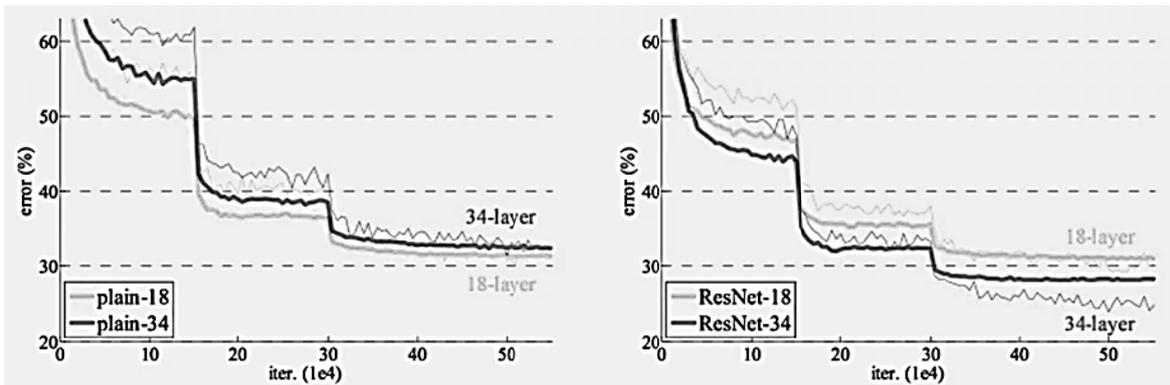


Рис. 3. График точности обычной сверточной сети и сети ResNet

Признаки, полученные при помощи сети ResNet-50, поступают на модифицированный механизм внимания.

Для модификации механизма внимания использовался алгоритм адаптивного смешивания [6]. Он включает два механизма смешивания: пространственное и канальное.

В механизме пространственного смешивания рассчитывается адаптивная матрица ве-

сов M_s , которая осуществляет суммирование признаков по пространственному измерению:

$$M_s = \text{Linear}(q) \in R^{P_{in} \times P_{out}}, \quad (2)$$

$$ASM(x) = \text{ReLU}(\text{LayerNorm}(x^T M_s)), \quad (3)$$

где $R^{P_{in} \times P_{out}}$ – матрица пространственных признаков, а $ASM(x)$ – выходные признаки пространственного смешивания.

В механизме канального смешивания применяется матрица размерности $C \times C$, где C обозначает количество каналов. Полученные с энкодера данные перемножаются с этой матрицей, что приводит к смешиванию признаков между каналами.

Матрица $R^{c \times c}$ рассчитывается независимо для каждой группы признаков. Выходные признаки канального смешивания $ASM(x)$ определяются согласно формулам:

$$M_c = \text{Linear}(q) \in R^{c \times c}, \quad (4)$$

$$ACM(x) = \text{ReLU}(\text{LayerNorm}(x M_c)), \quad (5)$$

где q – вектор позиционных включений, x – признаки с трансформер-энкодера, M_c – матрица канальных признаков.

Сеть окончного предсказания, построенная на основе сети прямого распространения (FFN), предсказывает координаты центра ограничивающих рамок, а также их высоту и ширину, линейный слой служит для предсказания имени класса.

Рассмотренный алгоритм обладает линейной сложностью от размеров входного изображения, что должно сократить и время обучения, и скорость обнаружения объектов.

Тестовый набор данных

В качестве тестового набора данных использовался набор данных, представляющий изображения дороги с различными дефектами или препятствиями. Набор был получен при помощи камеры, установленной на автомобиль, делающий снимки в разрешении 1920×1080 . На рис. 4 приведен пример размеченных изображений. В дальнейшем полученные изображения приводились к разрешению в 1333 пикселей по большей стороне.



Рис. 4. Пример размеченных изображений

Для каждого изображения был получен файл аннотаций, содержащий координаты и метки соответствующих классов [7]. Размеченные классы препятствий и их метки представлены в табл. 1. Структура набора данных представлена на рис. 5.

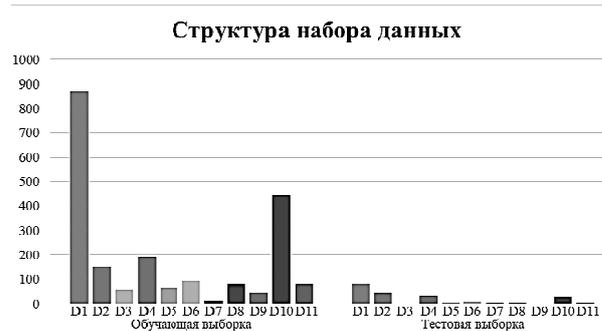


Рис. 5. Структура набора данных

Таблица 1
Виды препятствий на дорожном полотне
и их метки

Метка класса	Виды препятствий на дорожном полотне
D1	яма или неровность
D2	большая трещина
D3	лужа
D4	канализационный люк
D5	канализационная решетка
D6	лежачий полицейский
D7	приподнятый пешеходный переход
D8	посторонние предметы на дороге или мусор
D9	рельсы
D10	грязь или гравий на дороге
D11	срез полотна/ремонт дороги

Сверточная нейронная сеть строилась на основе библиотеки PyTorch 12.1. Обучение производилось в течение 300 эпох. Вычислительные эксперименты проводились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-12700; 32 ГБ ОЗУ; видеокарта GeForce RTX3080. Также были установлены библиотеки Python 3.11.5 и Anaconda 2021.05.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости ошибки обучения от количества эпох для обучающей и тестовой выборки соответственно. Как видно из рис. 6, для данного набора данных достаточно 50 эпох обучения [8], дальше модель начинает переобучаться.

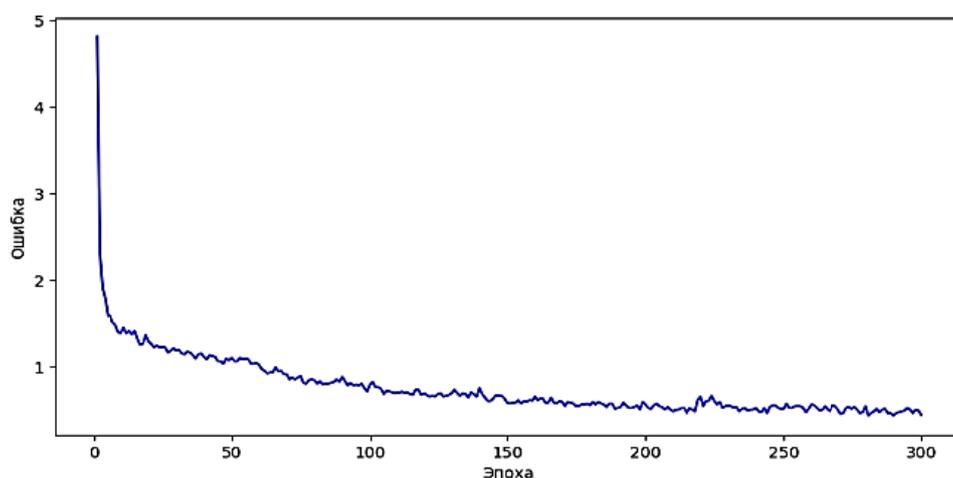


Рис. 6. Зависимость ошибки от количества эпох для обучающей выборки

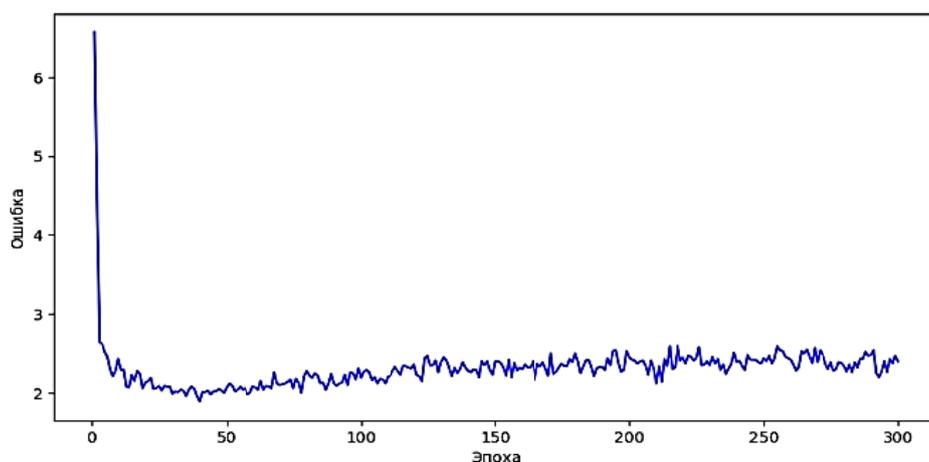


Рис. 7. Зависимость ошибки от количества эпох для тестовой выборки

На рис. 8 представлен пример распознанного изображения с метками классов и вероятностью их определения.



Рис. 8. Пример распознанного изображения

Заключение

Предложен вариант модификации алгоритма DETR, требующий меньше вычислительных ресурсов и обладающий сопоставимой точностью.

Для апробации предложенного варианта модификации алгоритма DETR собран набор данных. Сравнение полученных результатов работы оригинального и модифицированного алгоритмов DETR приводится в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов оригинального и модифицированного DETR

Набор данных	Оригинальный DETR	Модифицированный DETR
Точность, %	62,1	62,4
Время обучения, разница в %	100	83
Время обработки одного изображения, мс	76	72

Как видно из таблицы, модифицированный алгоритм обладает несколько большей точностью (62,4 % против 62,1 %) и скоростью обработки изображения (72 секунды против 76 секунд). Также модифицированный алгоритм обладает заметно лучшей сходимостью, что выражается в меньшем времени обучения (сокращение времени на 17 % в сравнении с оригинальным DETR).

Таким образом, можно сделать вывод, что модификация DETR показывает себя луч-

ше классической версии, сокращая время обучения и работы нейросети с некоторым приростом в эффективности.

Литература

1. End-to-end object detection with transformers / N. Carion [et al.] // Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK. August 23–28. 2020. Proceedings, Part I. pp. 213–229.
2. Модификация алгоритма DETR для обнаружения объектов в видеопотоке / А.И. Паршин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 20–25.
3. Лобанов М.Г., Шоломов Д.Л. Об ускорении архитектуры сверточной нейронной сети на базе ResNet в задаче распознавания объектов дорожной сцены // Информационные технологии и вычислительные системы, 2019. № 69 (3). С. 57–65.
4. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He [et al.] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016. P. 770–778.
5. Wickramasinghe C.S., Marino D.L., Manic M. ResNet Autoencoders for Unsupervised Feature Learning From High-Dimensional Data: Deep Models Resistant to Performance Degradation // IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 40511–40520.
6. AdaMixer: A Fast-Converging Query-Based Object Detector / Z. Gao [et al.] // In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022. P. 5364–5373.
7. BDD100K: A Diverse Driving Video Database with Scalable Annotation Tooling / F. Yu [et al.] // ArXiv e-prints, 2018. P. 1–16. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.04687v1> (дата обращения: 26.01.2026).
8. Srivastava R.K., Greff K., Schmidhuber J. Training very deep networks. ArXiv 1507.06228, 2015. P. 1–9. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2015/file/215a71a12769b056c3c32e7299f1c5ed-Paper.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

Информация об авторах

Паршин Александр Иванович – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Барabanov Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bav33@list.ru

Аралов Михаил Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: aralow@mail.ru

Determination of road obstacles and road defects using the modified DETR algorithm

A.I. Parshin, A.V. Barabanov, M.N. Aralov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This article presents a system for detecting road defects and obstacles requiring driver attention using pretrained neural networks based on a modified DETR algorithm with a modified attention mechanism based on an adaptive blending algorithm. The classic algorithm is characterized by high accuracy in detecting and classifying objects in images. The modification proposed in this article is based on the need to increase the accuracy of the DETR algorithm while reducing the computational resources required. An approach to object recognition using deep machine learning is described, which utilizes neural network retraining and develops an algorithm for identifying road defects. Test results are presented on various datasets representing road images with various defects or obstacles. The dataset was obtained using a camera mounted on a car, taking photos at a resolution of 1920x1080, after which the images were downsampled to a resolution of 1333 pixels on the longest side. Finally, the results of the classic and modified DETR algorithms are compared based on the following characteristics: accuracy, training time, and processing time per image.

Key words: object recognition; artificial neural network; image analysis; DETR; convolutional neural network

References

1. Carion N. et al. “End-to-end object detection with transformers”, *Proc., Part I.: Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, UK, August 23-28, 2020, pp. 213-229.
2. Parshin A.I. et al. “Modification of the DETR algorithm for detecting objects in a video stream”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 20-25.
3. Lobanov M.G., Sholomov D.L. “On accelerating the construction of a rotational neural network based on ResNet in the problem of identifying road accident objects”, *Information Technologies and Computing Systems (Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy)*, 2019, no. 69 (3), p. 57-65.
4. He K. et al. “Deep residual learning for image recognition”, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770-778.
5. Wickramasinghe C.S., Marino D.L., Manic M. “ResNet autoencoders for unsupervised feature learning from high-dimensional data: deep models resistant to performance degradation”, *IEEE Access*, 2021, v. 9, p. 40511-40520.
6. Gao Z. et al. “A fast-converging query-based object detector”, *Proc. of the IEEE/CVF Conf.: Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 5364-5373.
7. Yu F. et al. “BDD100K: a diverse driving video database with scalable annotation tooling”, *ArXiv e-prints*, 2018, pp. 1-16, available at: <https://arxiv.org/pdf/1805.04687v1> (date of access: 26.01.2026)
8. Srivastava R.K., Greff K., Schmidhuber J. “Training very deep networks”, *ArXiv 1507.06228*, 2015, pp. 1-9, available at: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2015/file/215a71a12769b056c3c32e7299f1c5ed-Paper.pdf> (date of access: 26.01.2026)

Submitted 09.12.2025; revised 26.01.2026

Information about the authors

Aleksandr I. Parshin, seeker, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Aleksandr V. Barabanov, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bav33@mail.ru

Mikhail N. Aralov, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: aralow@mail.ru

К вопросу определения решения моделей транспортных задач открытого типа методом дифференциальных рент

А.Н. Шелковой

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Проводится исследование вопросов определения решения плана транспортной задачи открытого вида, если имеется дисбаланс общего запаса отправителей и объёмных запросов клиентов. Во введении рассматривается общая постановка транспортной задачи открытого типа. Процесс нахождения оптимального плана задачи методом дифференциальных рент демонстрируется двумя примерами. В первом примере рассматривается ситуация превышения запросов адресатов над возможностями адресантов. В этом случае искусственно добавляется новый адресант. Во втором примере рассматривается ситуация превышения возможностей адресантов над запросами адресатов. В данном случае искусственно добавляется новый адресат. Таким образом, происходит трансформация открытой модели транспортной задачи в закрытую. Процесс нахождения оптимального плана осуществляется табличным способом. К исходной транспортной таблице добавляется столбец для помещения избытка и недостатка по строкам и строка для занесения разностей между минимальными стоимостями перевозки единицы груза, находящимися в избыточных строках, и такими же величинами, записанными в клетках со значением перемещённой продукции. Достоинства метода дифференциальных рент в сравнении с широко известным методом потенциалов отражены в заключении.

Ключевые слова: модель транспортной задачи открытого типа; условно-оптимальное распределение; минимальная стоимость перевозки груза; промежуточная рента; нераспределённый остаток нулевой величины; оптимальное решение транспортной задачи

Введение

Предлагаемая статья является продолжением работ автора о применении метода дифференциальных рент, опубликованных в ([3], [4]).

Во многих прикладных вопросах равновесие всей продукции адресантов и итоговыми интересами адресатов не безусловно, а в некоторых — обязательно не выполняется. Достаточно вспомнить недавнюю ситуацию с пандемией COVID-19. Количество имеющихся вакцин на аптечных складах должно было превышать их поставки в медицинские учреждения, перестраховываясь на случаи вспышки заболеваемости.

Напомним (см., например, [1]. С. 129-130), что транспортная задача трактуется открытой в случае нарушения баланса

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j. \quad (1)$$

Здесь a_i — объём товара на i -ой базе, $i = \overline{1, m}$; b_j — запросы j -го клиента. При этом n — количество адресатов, m — количество отправителей.

Если предложение преобладает над спросом, иначе говоря, когда

$$\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j,$$

искусственно создают $(n+1)$ -го получателя с интересами

$$b_{n+1} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j$$

и отвечающие стоимости перевозок единицы груза полагают нулевыми:

$$c_{i, n+1} = 0, i = \overline{1, m}.$$

Таким образом приходим к закрытой транспортной задаче с выполнением условия (1).

Подобным образом, если

$$\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j,$$

добавляют воображаемую $(m+1)$ -ю базу с величиной товара

$$a_{m+1} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i$$

и нулевыми ценами перевозок единицы продукции:

$$c_{m+1, j} = 0, j = \overline{1, n}.$$

Тем самым произошла трансформация к закрытой транспортной задаче; найдя её оптимальное решение, легко определить оптимальный план открытой задачи. Решение закрытой транспортной задачи обычно находят методом

потенциалов. В данной работе предлагается иной, предположительно менее трудоёмкий в отличие от метода потенциалов, способ с применением алгоритма метода дифференциальных рента ([1. С. 150-155], [2. С. 170-182]).

Основные положения обобщённого алгоритма метода дифференциальных рента содержатся в статье [3], объединяющей подходы, рассматриваемые в [1] и [2].

Рассмотрим два примера определения оптимального плана транспортных задач открытого типа.

Предлагаемый подход к их решению основан на применении метода дифференциальных рента, который в отличие от метода потенциалов, где требуется предварительное нахо-

ждение опорного плана одним из известных методов (например, северо-западного угла, минимального элемента, аппроксимации Фогеля), позволяет сразу находить оптимальный план. Преимущества метода дифференциальных рента в вычислительном плане отмечаются в заключении предлагаемой статьи.

Примеры определения оптимального плана транспортных задач открытого вида методом дифференциальных рента

Пример 1. Определить для задачи, исходные данные которой представлены в виде транспортной таблицы, оптимальный план методом дифференциальных рента.

Таблица 1

Поставщики (A _i)	Потребители (B _j)				Запасы (a _i)
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	
A ₁	1	7	5	2	450
A ₂	3	1	6	3	350
A ₃	4	3	2	6	500
Потребности (b _j)	300	500	350	350	1300
					1500

В данном случае выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^3 a_i < \sum_{j=1}^4 b_j,$$

таким образом, исходная транспортная задача принадлежит к открытому типу. Добавим искусственно четвёртого поставщика с объёмом имеющейся продукции

$$a_4 = \sum_{j=1}^4 b_j - \sum_{i=1}^3 a_i = 1500 - 1300 = 200.$$

и ассоциированные с ним тарифы обнулим:

$$c_{4j} = 0, j = 1, 4.$$

Произошла трансформация открытой модели задачи в закрытую транспортную задачу, определив её оптимальный план, найдём оптимальный план исходной модели. Транспортную задачу закрытого типа решим методом дифференциальных рента.

Процесс нахождения оптимального плана исходного примера осуществим табличным

способом. Осуществим переход от исходной табл. 1 к табл. 2 путём добавления нового столбца, в котором будем фиксировать избыток и недостаток по строкам и дополнительную строку, в которую будем помещать соответствующие разности.

Для каждого столбца новой табл. 2 найдём минимальные тарифы и заключаем их в круглые скобки. Во все эти клетки помещаем наиболее реально допустимые поставки продукции. В данном случае в клетку A₄B₁ записываем 200, в клетки A₄B₂, A₄B₃, A₄B₄ заносим нулевые поставки. Таким образом, в табл. 2 представлен так именуемый условно оптимальный план, из которого следует, что адресаты B₂, B₃, B₄ не получили ничего, частично удовлетворены запросы клиента B₁. В данном случае полностью перемещён груз адресанта A₄, не тронутыми оказались грузы отправителей A₁, A₂, A₃.

Таблица 2

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	Недостаток (-), избыток (+)
A_1	1	7	5	2	450	+450
A_2	3	1	6	3	350	+350
A_3	4	3	2	6	500	+500
A_4	⁽⁰⁾ 200	⁽⁰⁾ 0	⁽⁰⁾ 0	⁽⁰⁾ 0	200	-1300
B_j	300	500	350	350	1500	
Разность (Δ_j)	1	1	2	2		

Далее находим избыточные и недостаточные строки. В данном случае недостаточной будет строка A_4 , поскольку объём продукции отправителя A_4 весь перемещён, а интересы адресатов не выполнены. Значение не распределённой продукции равно 1300 единицам.

Фиксируем строки A_1 , A_2 и A_3 положительными по причине того, что запасы товара адресантов A_1 , A_2 и A_3 остались не использованными. При этом объём не перемещённого груза строки A_1 составляет 450 единиц, строки A_2 составляет 350 единиц, строки A_3 – 500 единиц. Объём не перемещённого товара $450+350+500=1300$ совпадает с суммарной недостаточностью запросов клиентов, численно $1500-200=1300$.

Закончив определение избыточных и недостаточных строк, для каждого столбца вычисляем разности минимальных стоимостей передвижения единицы продукции в избыточных строках с тарифами в клетках с информацией о величине перемещённого груза.

Определяем промежуточную ренту как наименьшую среди найденных разностей. Здесь она равна 1. Осуществляем переход к табл. 3, приплюсвав к стоимостям перевозки единицы груза строки A_4 промежуточную ренту.

В новой таблице количество клеток, куда будут перемещаться поставки продукции, оказывается большим на две. Данный факт объясняется обстоятельством увеличения на две минимальных стоимостей перевозки единицы груза, находящихся в каждом столбце табл. 3, из которой видно, что в столбцах B_1 и B_2 находят-

ся уже по две минимальные величины, равные 1. Данные величины заключаем в круглые скобки; в клетки, где они расположены, а также в клетки с заключёнными в круглые скобки наименьшими стоимостями перевозки единицы груза в остальных столбцах надо записать величины перемещаемой продукции. По итогу выделения данных клеток определяем порядок занесения в них величин перемещаемой продукции. Выделив и занеся поставку в определённую клетку, исключаем из рассмотрения данный столбец и начинаем заносить величину перемещаемой продукции очередной клетки. Здесь порядок записи величин поставок имеет такую последовательность. Первым делом записываем поставки в клетки A_4B_3 и A_4B_4 , поскольку только в них имеются тарифы, заключённые в круглые скобки, в столбцах B_3 и B_4 , и далее не используем данные столбцы. По итогу записи поставок в отмеченные клетки производим аналогичную процедуру с клетками A_1B_1 , A_2B_2 , A_4B_1 и A_4B_2 , вследствие их единственности для занесения величины перемещаемого груза в строках A_1 , A_2 и A_4 .

По окончании процедуры записи в клетки величин поставок определяем положительные и отрицательные строки. Объём нераспределённого остатка четвёртой строки нулевой. По причине того, что вторая заполненная объёмом поставленного товара в столбце B_2 , имеющем ещё одну общую с четвёртой строкой клетку с занесённой в неё величиной перемещённой поставки, располагается в недостаточной строке, строка A_4 полагается недостаточной.

Таблица 3

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	Недостаток (-), избыток (+)
A_1	(1) 300	7	5	2	450	+150
A_2	3	(1) 350	6	3	350	-650
A_3	4	3	2	6	500	+500
A_4	(1) 0	(1) 0	(1) 200	(1) 0	200	-0
B_j	300	500	350	350	900	
Разность (Δ_j)	-	2	1	1		

Определив избыточные и недостаточные строки, для каждого столбца вычисляем разности минимальных стоимостей передвижения единицы товара в избыточных строках со стоимостями перемещения единицы груза в клетках с информацией о величине поставленного товара. По причине того, что в столбце B_1 тариф, заключённый в круглые скобки, расположен в избыточной строке, разность для первого столбца не определяется.

Вычисляем промежуточную ренту как наименьшую среди найденных разностей. Здесь её величина равна 1. Формируем очередную табл. 4, к тарифам строк A_2 и A_4 которой приплюсовываем промежуточную ренту.

В новой таблице количество клеток для записи поставки перемещаемого груза стало больше на одну. Данный факт очевиден, поскольку количество минимальных стоимостей перемещения единицы продукции, находящихся во всех столбцах новой табл. 4, увеличилось на одну, замечаем, что в столбце B_4 располагаются уже два наименьших значения величиной 2. Заносим эти числа в круглые скобки; в клетки, где они расположены, надо записать величины поставок перемещаемого груза. Нужно также провести подобные записи и в клетки, где находятся наименьшие в остальных столбцах стоимости перемещения единицы продукции. Таковы клетки новой таблицы, где соответствующие стоимости перевозок единицы груза заключены в круглые скобки. По окончании выделения данных клеток определяем последовательность за-

писи в них величин перемещаемых поставок. Выделив и записав в определённую клетку величину поставленной продукции, не рассматриваем затем столбец с записанной в клетку поставкой и осуществляем процедуру занесения в очередную клетку величины перемещаемой продукции. Здесь последовательность записи величин поставок такова. Первым делом записываем поставку в клетку A_1B_1 , вследствие того, что только в ней тариф заключён в круглые скобки в столбце B_1 , и не используем далее данный столбец. По итогу записи в эту клетку величины поставки, записываем значения величин поставок груза в клетки A_1B_4 , A_2B_2 , A_3B_3 , A_4B_2 , A_4B_3 и A_4B_4 , поскольку только в них стоят заключённые в круглые скобки тарифы в строках A_1 , A_2 , A_3 и A_4 .

По окончании записи в клетки величин перемещённой продукции определяем положительные и отрицательные строки. Неперемещённые остатки второй и четвёртой строк оказались нулевыми. Вследствие того, что вторая клетка с записанной в ней поставкой, находящаяся в столбце B_3 , пересекаем с четвёртой строкой второй клеткой с записью значения величины отправленной продукции, располагается в недостаточной строке, строка A_4 полагается недостаточной. Поскольку вторая клетка с занесённой в неё поставкой, находящаяся в столбце B_2 , пересекающемся со второй строкой второй клеткой с записанной в неё величиной перемещённого груза, располагается в недостаточной строке, фиксируем строку A_2 недостаточной.

Таблица 4

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	Недостаток (-), избыток (+)
A_1	⁽¹⁾ 300	⁷	⁵	⁽²⁾ 150	450	-150
A_2	4	⁽²⁾ 350	⁷	4	350	-0
A_3	4	³	⁽²⁾ 350	⁶	500	+150
A_4	²	⁽²⁾ 150	⁽²⁾ 0	⁽²⁾ 50	200	-0
B_j	300	500	350	350	1500	
Разность (Δ_j)	3	1	-	4		

Изучая табл. 4, делаем вывод о существовании неперемещённого остатка. Возникает необходимость формирования очередной таблицы, поскольку найден условно оптимальный план модели задачи. Для каждого столбца вычисляем разности стоимостей передвижения единицы груза, заключённых в круглые скобки в выбранном столбце, и наименее отличающихся от них стоимостей перемещения единицы продукции в избыточных строках (табл. 4). Тем самым определяем промежуточную ренту. Она есть наименьшая между найденными разностями и равна 1. Формируем очередную табл. 5.

Приплюсовываем в новой таблице к тарифам избыточных строк A_1, A_2, A_4 табл. 4 промежуточную ренту, то есть 1.

Выделяем клетки с наименьшими стоимостями перевозок единицы груза и заносим в них

максимально возможные поставки. В первую очередь записываем величины перемещённой продукции в клетки A_1B_1, A_3B_3 , потом $A_1B_4, A_2B_2, A_3B_2, A_4B_2$ и A_4B_4 (в записанном порядке). В результате весь груз отправителей перемещается в соответствии с реальными интересами адресатов. Таким образом, определён оптимальный план заданной транспортной задачи:

$$X^* = \begin{pmatrix} 300 & 0 & 0 & 150 \\ 0 & 350 & 0 & 0 \\ 0 & 150 & 350 & 0 \end{pmatrix}$$

В данной ситуации общая величина стоимости перемещения продукции такова:

$$S = 150 \cdot (2+3) + 350 \cdot (1+2) + 300 = 2100$$

(стоимости перемещения единицы продукции берутся из табл. 1).

Таблица 5

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	\pm
A_1	⁽²⁾ 300	8	⁶	⁽³⁾ 150	450	0
A_2	⁵	⁽³⁾ 350	⁸	⁵	350	0
A_3	⁴	⁽³⁾ 150	⁽²⁾ 350	⁶	500	0
A_4	³	⁽³⁾ 0	³	⁽³⁾ 200	200	0
B_j	300	500	350	350	1500	

Пример 2. Определить для задачи, исходные данные которой представлены в виде

транспортной таблицы, оптимальный план методом дифференциальных рент.

Таблица 6

Пункты отправления (A _i)	Пункты назначения (B _i)			Запасы (a _i)
	B ₁	B ₂	B ₃	
A ₁	3	4	7	20
A ₂	1	5	3	70
A ₃	7	3	2	110
A ₄	4	6	6	140
Потребности (b _j)	130	80	80	340
				290

В данной ситуации имеет место соотношение

$$\sum_{i=1}^4 a_i > \sum_{j=1}^3 b_j,$$

таким образом, представленная транспортная задача имеет открытый тип. Добавим искусственно четвертого адресата с объёмом требований

$$b_4 = \sum_{i=1}^4 a_i - \sum_{j=1}^3 b_j = 340 - 290 = 50$$

и отвечающие ему стоимости перемещения единиц груза положим нулевыми:

$$c_{i4} = 0, i = \overline{1, 4}.$$

Произошло преобразование открытой модели задачи в закрытую модель транспортной задачи, найдя её оптимальный план, определим оптимальный план открытой модели. Для модели закрытого вида оптимальный план транспортной задачи определим, используя методом дифференциальных рент.

Процесс определения оптимального плана представленного примера осуществим табличным способом. Добавим новый столбец для обозначения избытка и недостатка по строкам и новую строку для занесения ассоциированных с ней разностей, преобразовав таким образом табл. 6 в очередную табл. 7.

Определяем наименьшие стоимости передвижения единицы груза для каждого столбца новой табл. 7 и заключаем их в круглые скобки. Все эти клетки заполняем наибольшими реальными значениями. Итогом данного процесса является так именуемый условно оптимальный план, из которого видно, что в полном объёме выполнены требования адресата B₂, не полностью – адресатов B₁, B₃, B₄. В данном случае в полном объёме отправлен имеющийся груз адресантов A₁, A₂ и A₃, остался неизменным объём груза адресанта A₄.

Таблица 7

A _i \ B _j	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	a _i	Недостаток (-), избыток (+)
A ₁	3	4	7	(0)	20	-30
A ₂	(1)	5	3	0	70	-60
A ₃	7	(3)	(2)	0	110	-50
A ₄	4	6	6	0	140	+140
b _j	130	80	80	50	340	
Разность (Δ _j)	3	3	4	-		

По итогу определения условно-оптимального плана фиксируем избыточные и недостаточные строки. В данном случае недостаточными являются строки A₁, A₂ и A₃, по

скольку объёмы груза адресантов A₁, A₂ и A₃ полностью отправлены, а запросы адресатов B₁, B₃ и B₄ не выполнены. Объём недостатка оказался равным 140 единицам.

Строка A_4 избыточная, поскольку объёмы груза адресанта A_4 отправлены не в полном объёме. В данной ситуации значение избытка строки A_4 оказалось 140 единиц, равное общему недостатку.

Закончив выделение избыточных и недостаточных строк, определяем разности стоимостей передвижения единицы продукции в избыточных строках и стоимостей перемещения единицы груза в клетках с информацией о величине отправленного товара для каждого столбца.

Вычисляем промежуточную ренту как наименьшую среди найденных разностей. В данной ситуации она оказалась равной 3. На основе табл. 7 создадим новую таблицу, сложив тарифы строк A_1, A_2, A_3 с промежуточной рентой.

Число клеток в созданной новой табл. 8 с занесённым в них объёмом перемещённого груза стало большим на две. Это объясняется тем фактом, что число наименьших тарифов во всех столбцах новой таблицы, возросло на два, а именно в столбцах B_1 и B_2 теперь расположены по два наименьших значения 4 в столбце B_1 и 6 в столбце B_2 . Указанные величины окаймляем круглыми скобками; в клетки с расположенными в них этими тарифами надо поместить объёмы перемещённой продукции. Требуется занести объёмы перемещённого груза и в клетки с наименьшими для остальных столбцов стоимостями передвижения единицы товара. Такими являются клетки сформированной табл. 8 с находящимися в них обведёнными круглыми скобками стоимостями перемещения единицы груза. Выделив данные клетки, определяем поря-

док заполнения их информацией о величине отправленного товара. Выбрав и заполнив значением объёма перемещённой продукции определённую клетку, исключаем из рассмотрения столбец, где она расположена, и заносим значение величины отправленного товара в очередную клетку. Порядок заполнения объёмами перемещённого груза получается таким. В первую очередь заполняем соответствующей информацией клетки A_3B_3 и A_4B_4 , поскольку они единственны для заполнения в столбцах B_3 и B_4 , не используем далее отмеченные столбцы. После занесения информации о поставках в клетки A_3B_3, A_4B_4 заносим аналогичную информацию в клетки $A_2B_1, A_3B_2, A_4B_1, A_4B_2$, так как только они возможны для помещения в них объёмов перемещённой продукции в строках A_2, A_3, A_4 .

По окончании занесения в клетки информации о поставках определяем избыточные и недостаточные строки. Получившиеся не перемещёнными остатки третьей и четвёртой строк оказались равными нулю. По причине того, что вторая клетка с помещённым в ней объёмом перемещённого груза, находящаяся в столбце B_1 , связанном с четвёртой строкой ещё одной клеткой с информацией о значении отправленной поставки, расположена в недостаточной строке, строка A_4 определяется недостаточной. Подобным образом, поскольку вторая клетка с информацией об отправленной продукции, находится в столбце B_2 , связанном с третьей строкой ещё одной клеткой с занесённым в неё объёмом перемещённой продукции, расположена в недостаточной строке, строка A_3 определяется недостаточной.

Таблица 8

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	Недостаток (-), избыток (+)
A_1	6	7	10	2	20	+20
A_2	(4) 70	8	6	3	70	-20
A_3	10	(6) 30	(5) 80	3	110	-0
A_4	(4) 60	(6) 30	6	(0) 50	140	-0
B_j	130	80	80	50	340	
Разность (Δ_j)	2	1	5	3		

Таблица 9

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	B_4	a_i	\pm
A_1	6	⁽⁷⁾ 20	⁽¹⁰⁾	⁽²⁾	20	0
A_2	⁽⁵⁾ 70	⁽⁹⁾	⁽⁷⁾	⁽⁴⁾	70	0
A_3	⁽¹¹⁾	⁽⁷⁾ 30	⁽⁶⁾ 80	⁽⁴⁾	110	0
A_4	⁽⁵⁾ 60	⁽⁷⁾ 30	⁽⁷⁾	⁽¹¹⁾ 50	140	0
B_j	130	80	80	50	340	

Заключение

Такие же результаты получаются в случае решения данных примеров методом потенциалов, но процесс решения в данном случае в вычислительном аспекте оказывается более громоздким. Во-первых, в методе дифференциальных рент сразу определяется оптимальный план, а метод потенциалов состоит из двух этапов, на первом из них нужно найти опорный план, из которого на втором этапе получается оптимальный; во-вторых, требуется построение циклов, которые иногда имеют сложную конфигурацию, и осуществлять перемещение груза по циклам; в-третьих, получать решения систем линейных уравнений для вычисления потенциалов.

Литература

1. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. М.: «Высшая школа», 1993. 336 с.
2. Коробов П.Н. Математическое программирование и моделирование экономических процессов. СПб.: ООО Издательство ДНК, 2003. 376 с.
3. Шелковой А.Н. Обобщенный алгоритм метода дифференциальных рент нахождения оптимального плана транспортной задачи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 9. С. 43-46.
4. Шелковой А.Н. Особенности решения задач транспортного типа с вырожденным опорным планом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 5-1. С. 48-51.

Поступила 24.06.2025; принята к публикации 26.01.2026

Информация об авторе

Шелковой Александр Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики и физико-математического моделирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shelkovoja.aleksandr@mail.ru

Some aspects of finding an optimal plan for open-type transport problems by the method of differential rents

A.N. Shelkovoy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This paper explores the challenges of finding a solution to an open-ended transportation problem plan when there is an imbalance between the total inventory of shippers and the volumetric demands of customers. The introduction discusses the general formulation of an open-ended transportation problem. The process of finding the optimal plan for the problem using the differential rent method is demonstrated by two examples. The first example examines a situation where the recipients' demands exceed the senders' capabilities. In this case, a new sender is artificially added. The second example examines a situation where the senders' capabilities exceed the recipients' demands. In this case, a new recipient is artificially added. Thus, the open-ended transportation problem model is transformed into a closed-ended one. The process of finding the optimal plan is carried out using a tabular method. A column is added to the original transportation table for storing surpluses and shortages by row, and a row is added for recording the differences between the minimum unit transportation costs found in the surplus rows and the same values recorded in the cells with the value of the transported product. The advantages of the differential rent method, compared to the widely known potential method, are reflected in the conclusion.

Key words: open-ended transportation problem model; conditionally optimal distribution; minimum cost of freight transportation; intermediate rent; undistributed remainder of zero value; optimal solution to the transportation problem

References

1. Akulich I.L. "Mathematical programming in examples and problems" ("Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh"), Moscow: Vysshaya shkola, 1993, 336 p.
2. Korobov P.N. "Mathematical programming and modeling of economic processes" ("Matematicheskoe programmirovaniye i modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov"), St. Petersburg: DNK, 2003, 376 p.
3. Shelkovoy A.N. "Generalized algorithm of the differential rent method for finding the optimal plan for a transportation problem", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012. vol. 8, no. 9, pp. 43-46.
4. Shelkovoy A.N. "Features of solving transportation-type problems with a degenerate support plan", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 5-1, pp. 48-51.

Submitted 24.06.2025; revised 26.01.2026

Information about the author

Aleksander N. Shelkovoy, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shelkovej.aleksandr@mail.ru

Веб-приложение для анализа термодинамических циклов одноступенчатых холодильных машин

К.Г. Королев, О.В. Калядин, А.В. Сергеев, М.А. Авдеев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается создание специализированного веб-приложения, предназначенного для автоматизированного расчета и анализа термодинамических циклов одноступенчатых парокомпрессионных холодильных машин. Основное внимание уделено расширению возможностей моделирования процессов с использованием широкого спектра современных хладагентов, включая однокомпонентные и многокомпонентные рабочие среды с возможностью задания произвольной концентрации компонентов. Основные цели разработки: расширение круга пользователей путем реализации интуитивно понятного интерфейса, основанного на передовых технологиях проектирования SPA (Single Page Application); возможность интеграции популярных библиотек для эффективного вычисления тепловых и физических свойств рабочей среды, таких как CoolProp и REFPROP, обеспечивающих высокую точность результатов; предоставление инструментов для исследования влияния изменений температуры кипения и конденсации на ключевые показатели эффективности холодильных установок; развитие методов визуализации процесса моделирования, включающего детализированные диаграммы T-S и P-H, помогающие лучше понять особенности протекания термодинамического цикла. Особенности приложения являются удобный пользовательский интерфейс, оптимизированный для мобильных устройств благодаря применению принципов адаптивного дизайна; поддержка множества типов хладагентов, что значительно упрощает процесс подбора оптимального решения для конкретной инженерной задачи; высокая производительность серверной части приложения, обеспечиваемая использованием высокоскоростного фреймворка FastAPI и эффективных алгоритмов обработки запросов. Таким образом, разработанная система становится мощным инструментом поддержки научных исследований, проектных разработок и образовательных мероприятий, способствуя повышению качества проектирования и эксплуатации холодильных систем.

Ключевые слова: холодильные машины; термодинамика; веб-приложение; coolprop; refprop

Введение

Развитие информационных технологий позволяет адаптировать их применение для решения инженерных задач.

В настоящее время существует множество приложений для расчета параметров холодильных циклов, однако далеко не во всех есть возможность работы с новыми перспективными хладагентами, а также авторам не известны программы, позволяющие строить и рассчитывать циклы холодильных машин, которые в качестве рабочих веществ используют многокомпонентные смеси с заданной концентрацией.

Целью данной работы является разработка веб-приложения, которое позволяет решать следующие задачи:

- осуществлять расчет параметров рабочего тела в характерных точках регенеративного и нерегенеративного циклов парокомпрессионных холодильных машин при использовании большинства известных хладагентов и смесей на их основе (как в стандартной, так и произвольной концентрации);

- выполнять построение указанных циклов в T-s и P-h координатах;

- осуществлять расчет удельных параметров циклов и основных характеристик холодильных машин заданной холодопроизводительности;

- визуализировать влияние температуры кипения и конденсации на рассчитанные характеристики;

- анализировать влияние изменения рабочего вещества или концентрации смеси на параметры цикла и холодильной машины в целом.

Холодильные машины

На рис. 1 показаны принципиальные схемы одноступенчатых парокомпрессионных холодильных машин [1], расчет для которых выполняется в веб-приложении. В схеме на рис. 1б дополнительно предусмотрен теплообменник V, позволяющий организовать регенеративный теплообмен в цикле, что защищает компрессор от влажного хода, способствует организации циркуляции масла в системе, а также для большинства хладагентов позволяет увеличить холодильный коэффициент.

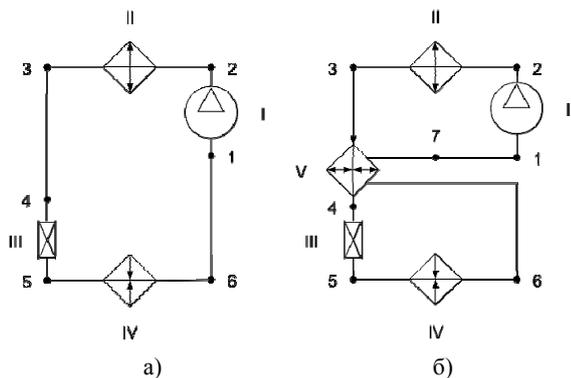


Рис. 1. Схемы одноступенчатых холодильных машин нерегенеративного (а) и регенеративного (б) циклов: I - компрессор, II - конденсатор, III - дроссельное устройство, IV - испаритель, V - регенеративный теплообменник

На схемах можно выделить следующие процессы:

- 1–2 - сжатие пара в компрессоре;
- 2–3 - охлаждение и конденсация пара в конденсаторе;
- 3–4 - переохлаждение жидкого хладагента в регенеративном теплообменнике;
- 4–5 - расширение хладагента в дроссельном устройстве;
- 5–6 - кипение жидкой фазы и перегрев пара в испарителе;
- 6–7 - перегрев пара в регенеративном теплообменнике;
- 7–1 - перегрев пара в линии всасывания.

Пользовательский интерфейс

Макет интерфейса веб-приложения (рис. 2) разработан на основе технологии Single Page Application (SPA) [2], которая позволяет ускорить взаимодействие пользователя и увеличить отзывчивость и быстродействие веб-приложения.



Рис. 2. Макет интерфейса веб-приложения

Для разработки пользовательского интерфейса веб-приложения используется библиотека Fomantic-UI (далее UI), которая имеет модульную архитектуру с множеством элементов и позволяет создавать адаптивные и интерактивные макеты сайтов [3].

Интерфейс веб-приложения реализует концепцию адаптивного дизайна, что позволяет автоматически изменять внешний вид и структуру в зависимости от размеров экрана устройства, на котором он отображается. Поэтому основные блоки:

- 1) исходные данные;
- 2) параметры;
- 3) точки цикла;
- 4) диаграммы;
- 5) графики размещены внутри HTML контейнера с классом Grid UI.

Для построения графиков и диаграмм пользовательского интерфейса использовалась библиотека Chart.js [4].

Блок «Исходные данные» позволяет пользователю осуществить выбор рабочего вещества и ввод значений исходных параметров.

Диаграмма взаимодействия пользователя с веб-приложением при вводе исходных данных представлена на рис. 3.



Рис. 3. Диаграмма взаимодействия пользователя при вводе исходных данных

В качестве рабочего вещества для моделирования циклов пользователь может использовать хладагенты, которые предустановлены в базе данных библиотеки CoolProp [5] (табл. 1) или создать из них многокомпонентную смесь.

Для выбора рабочего вещества разработан компонент интерфейса на основе модуля Dropdown UI, который представляет собой выпадающий список и позволяет пользователю выбрать значение из нескольких вариантов.

В случае выбора двух и более веществ, необходимо установить в соответствующее поле их концентрацию в массовых процентах.

Для выполнения расчета необходимо установить в поля формы числовые значения следующих параметров:

- холодопроизводительность холодильной машины;
- температура кипения;
- перегрев в испарителе;
- температура конденсации;
- перегрев в регенеративном теплообменном аппарате;
- перегрев на линии всасывания;
- изоэнтропный КПД компрессора;
- коэффициент подачи.

Таблица 1

Перечень используемых хладагентов

№	Название	№	Название	№	Название
1	R11	21	R14	41	R404A
2	R113	22	R141b	42	R407C
3	R114	23	R142b	43	R41
4	R115	24	R143a	44	R410A
5	R1150	25	R152A	45	R50
6	R116	26	R161	46	R507A
7	R12	27	R170	47	R600
8	R123	28	R21	48	R600A
9	R1233zd(E)	29	R218	49	R601
10	R1234yf	30	R22	50	R601a
11	R1234ze(E)	31	R227EA	51	R717
12	R1234ze(Z)	32	R23	52	R718
13	R124	33	R236EA	53	R720
14	R1243zf	34	R236FA	54	R728
15	R125	35	R245ca	55	R729
16	R1270	36	R245fa	56	R732
17	R13	37	R290	57	R740
18	R1336MZZE	38	R32	58	R744
19	R134a	39	R365MFC	59	RC318
20	R1311	40	R40	60	RE143A

Диаграмма взаимодействия пользователя с веб-приложением при анализе расчетных данных представлена на рис. 4.

Некоторые элементы интерфейса предусматривают всплывающие подсказки, которые реализованы с помощью модуля PopUp UI.

Для активации возможности построения графических зависимостей расчетных параметров от температуры кипения и/или температуры конденсации выбранного рабочего вещества, необходимо установить соответствующий элемент Toggle UI в активное положение и при необходимости изменить значения отклонения температуры в меньшую ($-\Delta$) и большую ($+\Delta$) стороны относительно заданного значения.

Кнопка запуска расчета реализует функционал метода API UI для асинхронных запросов с функцией обратного вызова, что позволяет ускорить получение данных после выполнения расчета без перезагрузки веб-страницы.

После успешного расчета появляются дополнительные элементы управления для просмотра исходных данных расчета с требуемым порядковым номером, которые активируют модальное окно, используя модуль Modal UI.



Рис. 4. Диаграмма взаимодействия пользователя при анализе расчетных данных

При последовательном выполнении расчетов (для разных рабочих веществ и/или разных значениях исходных данных) активирован режим анализа полученных данных, который позволяет сравнивать результаты всех последующих расчетов с первоначальным. Выход из этого режима возможен путем перезагрузки веб-страницы.

Для удобства идентификации данных пользователем при выполнении нескольких последовательных расчетов (в режиме сравнения), предусмотрена цветовая палитра.

Палитра помогает визуализировать элементы управления и графические результаты в

блоках «**Диаграммы**» и «**Графики**», окрашивая их в соответствии с порядковым номером расчета, равным индексу цветовой палитры.

Блок «Параметры» содержит результаты расчета параметров цикла:

- давления кипения и конденсации;
- удельная холодопроизводительность (массовая и объемная);
- удельная тепловая нагрузка конденсатора;
- удельная работа сжатия (теоретическая и действительная);
- холодильный коэффициент;
- температура нагнетания при теоретическом (изоэнтропном) и действительном сжатии;
- отношение давлений в цикле, а также характеристики холодильной машины, реализующей данный цикл и имеющей заданную в блоке исходных данных холодопроизводительность:
- массовый расход хладагента;
- тепловой поток в конденсаторе;
- потребляемая мощность в компрессоре;

- действительная и теоретическая подачи компрессора.

Если в блоке исходных данных не указываются значения изоэнтропного КПД и коэффициента подачи, их средние величины, необходимые для расчета потребляемой мощности и теоретической объемной подачи, рассчитываются программой автоматически.

В режиме сравнения программа определяет и добавляет к расчетным значениям цветовой индикатор (↑ или ↓) и величину процентного отклонения от первоначального расчета для всех последующих значений.

С помощью элемента пользовательского интерфейса Toggle UI реализована возможность переключения отображения соответствующих графических зависимостей в блоке «**Графики**».

Блок «Точки цикла» выводит значения основных термодинамических величин (давление, температура, энтальпия, энтропия, плотность, степень сухости) в характерных точках цикла холодильной машины (рис. 5).

Точки цикла						
	P	T	H	S	D	Q
1	0.157	19	418.334	1.845	6.844	+
	0.463 ↑ 66.1%	19	448.248 ↑ 6.7%	1.962 ↑ 6%	14.835 ↑ 53.9%	+
2	1.017	93.497	476.225	1.879	37.915	+
	2.419 ↑ 58%	115.453 ↑ 19.1%	519.794 ↑ 8.4%	2.001 ↑ 6.2%	62.064 ↑ 39%	+
3	1.017	40	419.428	1.711	50.085	1
	2.419 ↑ 58%	40 ↓ -0.1%	425.446 ↑ 1.5%	1.729 ↑ 1.1%	103.237 ↑ 51.5%	1
4	1.017	40	256.409	1.19	1146.739	0
	2.419 ↑ 58%	39.88 ↓ -0.4%	266.101 ↑ 3.7%	1.22 ↑ 2.5%	976.457 ↓ -17.5%	0
5	1.017	28.562	239.645	1.136	1194.871	-
	2.419 ↑ 58%	29.87 ↑ 4.4%	247.801 ↑ 3.3%	1.161 ↑ 2.2%	1039.867 ↓ -15%	-
6	0.157	-16	239.645	1.157	27.143	0.289
	0.463 ↑ 66.1%	-16.066 ↑ 0.5%	247.801 ↑ 3.3%	1.19 ↑ 2.8%	57.464 ↑ 52.8%	0.299 ↑ 3.3%
7	0.157	-16	389.016	1.738	7.967	1
	0.463 ↑ 66.1%	-16 ↓ -0.1%	415.761 ↑ 6.5%	1.843 ↑ 5.8%	17.805 ↑ 55.3%	1
8	0.157	-6	397.313	1.77	7.6	+
	0.463 ↑ 66.1%	-6	425.466 ↑ 6.7%	1.88 ↑ 5.9%	16.777 ↑ 54.7%	+
9	0.157	14	414.077	1.83	6.981	+
	0.463 ↑ 66.1%	14	443.766 ↑ 6.7%	1.946 ↑ 6%	15.173 ↑ 54%	+

Рис. 5. Скриншот части блока «Точки цикла» в режиме сравнения хладагентов R134a и R410a (исходные данные по умолчанию)

Блок «**Диаграммы**» служит для визуализации моделируемых циклов на T-s и P-h диаграммах, включая построение кривой насыщения выбранного рабочего вещества и характерных точек цикла (рис. 6), а также расчетной схемы текущего цикла (выбор схемы производится автоматически в зависимости от того,

указал или не указал пользователь степень перегрева в регенеративном теплообменнике).

Пользовательский интерфейс блока предусматривает созданные на основе модуля Tab UI вкладки, которые позволяют переключаться между соответствующими разделами контента.

Построение графических зависимостей реализуется с помощью библиотеки Chart.js,

которая обладает подробной документацией, высоким уровнем настройки и скоростью рабо-

ты, интерактивными функциями и адаптивным дизайном.

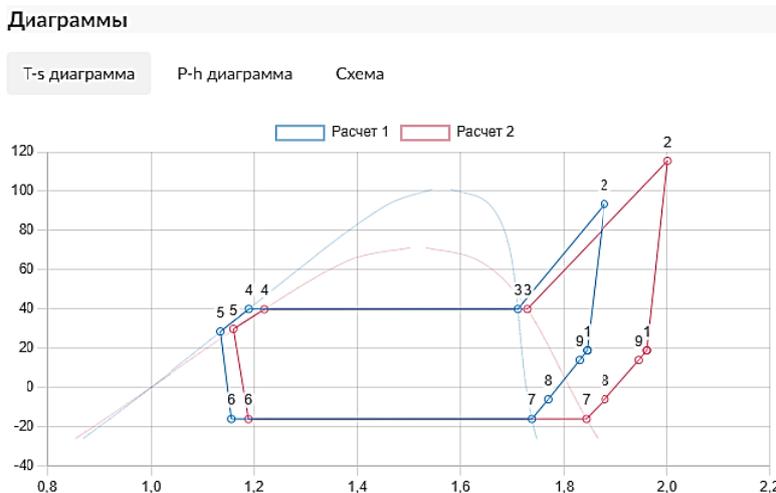


Рис. 6. Скриншот блока «Диagramмы» в режиме сравнения хладагентов R134a и R410a (исходные данные по умолчанию)

Диаграмма имеет элементы управления для переключения отображения набора данных выбранного расчета.

Блок «Графики» позволяет получить графические зависимости расчетных параметров цикла и характеристик холодильной машины от температуры кипения или температуры конденсации хладагента (рис. 7).

построена на концепции REST API [7], схема которой представлена на рис. 8.



Рис. 8. Схема клиент-серверного взаимодействия веб-приложения

Графики

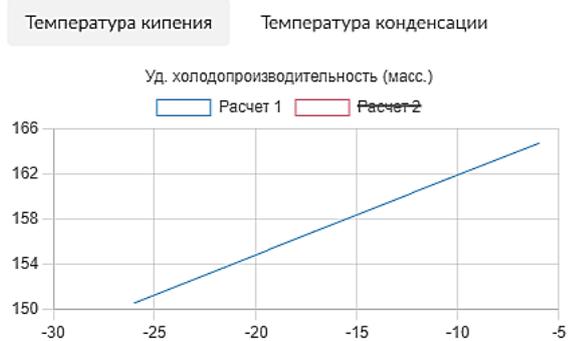


Рис. 7. Скриншот блока «Графики» в режиме сравнения хладагентов R134a и R410a (исходные данные по умолчанию)

При необходимости можно скрывать/показывать результаты того или иного расчета на координатной плоскости.

Серверная часть

Разработка веб-приложения выполнялась в редакторе Visual Studio Code на основе библиотеки FastAPI [6]. Архитектура веб-приложения

Для генерации HTML файлов используется библиотека Jinja2 [8], которая является шаблонизатором для языка программирования Python, позволяя создавать шаблоны, заполненные динамическими данными.

Основные расчеты теплофизических свойств жидкостей и газов выполняются с помощью библиотеки CoolProp, которая основана на уравнениях состояния и моделях, позволяющих для однокомпонентных веществ с высокой точностью и эффективностью рассчитывать термодинамические свойства с различными входными параметрами, что обеспечивает надежные результаты в различных инженерных приложениях. Для расчета многокомпонентных веществ применяется база данных библиотеки REFPROP [9], которая использует уравнения состояния, разработанные на основе экспериментальных данных для расчета теплофизических свойств жидкостей и газов.

Диапазон температур при построении кривой насыщения на термодинамических диаграммах изменяется от температуры кипения ($T_{кип} - 10\text{ K}$) до критической температуры ($T_{крит} - 0,1\text{ K}$), что вызвано ограничениями расчетной модели в околочитической области.

При расчете смесей в качестве максимальной температуры расчетного диапазона принимается минимальная критическая температура среди всех компонентом смеси.

Описание работы приложения

При первой загрузке веб-приложения в блоке исходных данных по умолчанию установлены значения параметров и выбрано рабочее вещество. При необходимости пользователь может внести необходимые изменения. Для начала расчета необходимо нажать кнопку «Расчет». В случае успешного выполнения блоки веб-приложения изменяют свои значения.

В случае возникновения ошибки в процессе выполнения расчета, пользователю выводится уведомление. Например, на рис. 9 представлен скриншот уведомления об ошибке, которая возникает при расчете в области температур выше максимально допустимой для хладагента R134a в библиотеки CoolProp.

Ошибка

```
PT: [TPFLSH error 1] One or more inputs are out of range;
Temperature above 1.5x(upper limit): T = 1282.15 K, Tmax =
455.000 K. :
PropsSI("H","T",1282.15,"P",157281.4574,"R134a")
```

Рис. 9. Скриншот уведомления об ошибке

Заключение

В работе представлено веб-приложение для расчета и анализа термодинамических циклов холодильных машин, использующих в качестве рабочих веществ однокомпонентные хладагенты и смеси на их основе в произвольной концентрации.

В работе приведены расчетные схемы холодильных машин и перечень используемых хладагентов. Также приведены скриншоты

элементов интерфейса веб-приложения, описаны возможности и технологии, используемые при разработке клиентской и серверной части веб-приложения.

Разработанное веб-приложение может быть интересно пользователям для организации учебного процесса, оценки перспектив применения альтернативных хладагентов, исследования новых многокомпонентных веществ, анализа эффективности работы существующего холодильного оборудования.

Литература

1. Холодильные машины: учебник / Л.С. Тимофеевский, А.В. Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И. Пекарев. СПб.: Издательство Политехника, 2006. 944 с.
2. Лопатина А.М. Использование технологии single page application для разработки современных приложений // Вестник современных исследований. 2018. № 8.3(23). С. 260-261. EDN YKZGVF.
3. Fomantic/Fomantic-UI-CSS: CSS only distribution of Fomantic UI: GitHub. URL: <https://github.com/fomantic/Fomantic-UI-CSS> (дата обращения: 07.10.2025).
4. chartjs/chart.js: Simple HTML5 Charts using the <canvas> tag: GitHub. URL: <https://github.com/chartjs/Chart.js> (дата обращения: 07.10.2025).
5. CoolProp/CoolProp: Thermophysical properties for the masses: GitHub. URL: <https://github.com/CoolProp/CoolProp> (дата обращения: 07.10.2025).
6. fastapi/fastapi: FastAPI framework, high performance, easy to learn, fast to code, ready for production. GitHub. URL: <https://github.com/fastapi/fastapi> (дата обращения: 07.10.2025).
7. Сарбуков Л.Р., Елисеева Д.Ю. Построение веб-приложений на базе REST API building web applications based on REST API // Наука. Производство. Образование - 2024: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. М.: Российский государственный социальный университет, 2025. С. 289-294. EDN CQTUWH.
8. pallets/jinja: A very fast and expressive template engine. GitHub. URL: <https://github.com/pallets/jinja> (дата обращения: 07.10.2025).
9. REFPROP | NIST: National Institute of Standards and Technology. URL: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (дата обращения: 07.10.2025).

Поступила 14.11.2025; принята к публикации 24.01.2026

Информация об авторах

Королев Константин Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: korolev.kg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0611-7296

Калядин Олег Витальевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kaljadin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0770-5025

Сергеев Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4417-1480

Авдеев Михаил Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: miguel14@mail.ru, ORCID: 0009-0002-5493-6122

Web application for thermodynamic cycle analysis of single-stage refrigeration units

K.G. Korolev, O.V. Kalyadin, A.V. Sergeev, M.A. Avdeev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This article describes the development of a specialized web application for the automated calculation and analysis of thermodynamic cycles in single-stage vapor-compression refrigeration units. The focus is on expanding the capabilities of process modeling using a wide range of modern refrigerants, including single- and multi-component working fluids with the ability to specify arbitrary component concentrations. The main development goals are: expanding the user base by implementing an intuitive interface based on advanced SPA (Single Page Application) design technologies; integrating popular libraries for efficiently calculating the thermal and physical properties of the working fluid, such as CoolProp and REFPROP, ensuring highly accurate results; providing tools for studying the impact of changes in boiling and condensing temperatures on key performance indicators of refrigeration units; and developing visualization methods for the modeling process, including detailed T-S and P-H diagrams, which help better understand the features of the thermodynamic cycle. The application features a user-friendly interface optimized for mobile devices using responsive design principles. Support for multiple refrigerant types, significantly simplifying the process of selecting the optimal solution for a specific engineering task; and high performance of the application's server side, ensured using the high-speed FastAPI framework and efficient query processing algorithms. Thus, the developed system becomes a powerful tool for supporting scientific research, design development, and educational activities, contributing to improved quality of refrigeration system design and operation.

Key words: refrigeration units; thermodynamics; web application; coolprop; refprop

References

1. Timofeevskiy L.S., Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I. "Refrigerating machines" ("Kholodil'nye mashiny"), textbook, St. Petersburg: Polytekhnik, 2006, 944 p.
2. Lopatina A.M. "Using single-page application technology to develop modern applications", Bulletin of Modern Research (Vestnik sovremennykh issledovaniy), 2018, no. 8.3(23), pp. 260-261.
3. Fomantic/Fomantic-UI-CSS: CSS only distribution of Fomantic UI, available at: <https://github.com/fomantic/Fomantic-UI-CSS> (date of access: 07.10.2025)
4. CoolProp/CoolProp: Thermophysical properties for the masses, available at: <https://github.com/CoolProp/CoolProp> (date of access: 07.10.2025)
5. chartjs/chart.js: Simple HTML5 Charts using the <canvas> tag, available at: <https://github.com/chartjs/Chart.js> (date of access: 07.10.2025)
6. fastapi/fastapi: FastAPI framework, high performance, easy to learn, fast to code, ready for production, available at: <https://github.com/fastapi/fastapi> (date of access: 07.10.2025)
7. Sarbukov L.R., Eliseeva D.Yu. "Creating web applications based on REST API", Proc. of the IV All-Russian Scientific and Technical Conf.: Science. Production. Education - 2024: (Nauka. Proizvodstvo. Obrazovanie - 2024), Moscow: Russian State Social University, 2025, pp. 289-294.
8. pallets/jinja: A very fast and expressive template engine, available at: <https://github.com/pallets/jinja> (date of access: 07.10.2025)
9. REFPROP | NIST [Electronic resource]: National Institute of Standards and Technology, available at: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (date of access: 07.10.2025)

Submitted 14.11.2025; revised 24.01.2026

Information about the authors

Konstantin G. Korolev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: korolev.kg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0611-7296

Oleg V. Kalyadin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kaljadin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0770-5025

Aleksandr V. Sergeev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4417-1480

Mikhail A. Avdeev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: miguel14@mail.ru, ORCID: 0009-0002-5493-6122

Архитектура нейронной сети многофункционального агента на базе глубокого обучения с подкреплением

В.В. Кашко, С.А. Олейникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. В контексте практического применения глубокого обучения с подкреплением к задачам построения систем искусственного интеллекта, включая интеллектуальную робототехнику, возникает проблема, связанная с обеспечением множественности форм поведения под управлением одного агента. Агент, основанный на глубоком обучении с подкреплением, строится на базе глубокой нейронной сети, способной аппроксимировать только одну стратегию принятия решений по причине низкой репрезентативной способности нейросетевого аппарата. На сегодняшний день не существует нейросетевой архитектуры, позволяющей быстро и качественно обучаться нескольким навыкам без потери знаний. Исходя из этого, данная задача является актуальной, ее решение предлагается в контексте настоящей работы. Объект исследования – глубокая нейронная сеть агента, основанного на алгоритме глубокого обучения с подкреплением. В качестве предмета рассматривается нейросетевая архитектура, позволяющая обеспечить запоминание множества стратегий без потери ранее полученных знаний. Цель работы заключается в построении архитектуры нейронной сети агента, способной объединить в себе множество различных стратегий. Предлагаемая архитектура строится на базовых идеях Mixture of experts и Progressive neural networks, объединяя в себе результаты последних исследований нейробиологии в области изучения ретикулярной формации чёрной субстанции. Внедрены переключающие нейроны, обеспечивающие регуляцию активности областей нейронной сети в соответствии с требуемым локомоторным паттерном по принципу, похожему на Dropout регуляризацию, обеспечивая сеть возможностью обучаться множеству навыков. Полученные результаты применяются для решения задачи управления локомоцией шагающего робота.

Ключевые слова: нейронная сеть; архитектура; глубокое обучение с подкреплением; переключающий нейрон; шагающий робот

Введение

Развитие машинного обучения и глубоких нейронных сетей сделали возможным обучение на базе непосредственного взаимодействия с окружающей средой методом проб и ошибок, при котором агент формирует стратегию принятия решений в зависимости от состояний окружающей среды и её реакции на оказанное воздействие.

Данный подход, именуемый глубоким обучением с подкреплением (ОП), позволяет аппроксимировать политику, свойственную конкретной задаче и не способен предоставить универсальный инструмент для обучения решению множества разнообразных задач, в связи с низкой репрезентативной способностью нейросетевого аппарата [1, 2]. Это является актуальной проблемой, как для построения систем искусственного интеллекта, так и для интеллектуальной робототехники, которой посвящено основное исследование, где главной решаемой задачей является разработка системы управления мобильным шагающим роботом на основе глубокого обучения с под-

креплением, способного перемещаться по разнообразному рельефу, автономно подстраиваясь под условия окружающей среды.

Поскольку проблематика локомоции обладает вариативностью поведения и зависимостью стратегий для одной и той же двигательной программы от рельефа местности и иных факторов, актуальным вопросом является поиск способа обеспечения агента способностью обучаться множеству локомоторных программ и использовать их, в зависимости от конкретной ситуации. Агент, основанный на глубоком обучении с подкреплением, строится на базе глубокой нейронной сети. Если обученного агента поместить в иную среду, не похожую на предыдущую, его сеть аппроксимирует новую стратегию принятия решений, «забыв» ранее изученную [3]. Данный эффект называется «забыванием». Исходя из этого, для ликвидации соответствующего последствия актуальным является вопрос расширения репрезентативности сети путём изменения её архитектуры.

Другим немаловажным вопросом является способ маркирования навыков, поскольку в процессе функционирования агенту необходимо иметь представление о способе манипуляции полученными ранее знаниями [4]. В каче-

стве объекта исследования выступает глубокая нейронная сеть агента, основанного на алгоритме глубокого обучения с подкреплением.

Исследуемым предметом является архитектура глубокой нейронной сети, позволяющая обеспечить запоминание множества стратегий без потери ранее полученных знаний и механизм селекции ранее изученных навыков.

Цель исследования заключается в построении архитектуры нейронной сети агента, способной объединить в себе множество различных стратегий без эффекта «забывания» и обеспечить простой и удобный механизм выбора.

Вклад настоящей работы заключается в объединении базовых идей подходов *Mixture of experts* и *Progressive neural networks* путём внедрения *переключающих нейронов*, обеспечивающих разделение нейронной сети на множество подсетей, обучающихся отдельно друг от друга (или с учётом боковых связей) некоторым стратегиям принятия решений.

Идея нейронов-переключателей основывается на последних исследованиях в области нейробиологии, посвящённых изучению базальных ганглиев, принадлежащих ретикулярной формации чёрной субстанции (*Substantia Nigra pars reticulata*) – совокупности нервных структур, расположенных в стволе головного мозга и отвечающих за активацию и деактивацию движений путём воздействия на двигательные центры.

Введена концепция *нейронного кластера* – нейронной сети ограниченного размера, характеризующейся программной ёмкостью – количеством локомоторных программ, которое он способен запомнить. Решена проблема маркирования навыков, озвученная, но не решённая в статье-первоисточнике, посвящённой описанию *Progressive neural networks*.

В результате, предлагаемая архитектура позволяет реализовать как независимое запоминание нескольких стратегий, так и учитывать ранее изученные политики, путём применения боковых связей, предложенных в работе, посвящённой прогрессивным нейронным сетям и применима для задач построения искусственного интеллекта и интеллектуальной робототехники. Полученные результаты используются для решения одной из главных задач основного исследования, посвящённого построению адаптивной системы управления шагающим роботом на базе глубокого обучения с подкреплением.

Анализ проблематики

Алгоритм глубокого обучения с подкреплением строится на базе аппарата нейронных сетей. Как правило, одна сеть способна аппроксимировать лишь одну стратегию принятия решений для конкретной задачи, по причине низкой репрезентативной способности [5]. Если обученного некоторой политике агента применить к другой задаче, не похожей на предыдущую, то произойдёт его адаптация к новым условиям, в результате чего агент теряет ранее изученный навык. Возникает эффект «забывания». Для ликвидации соответствующего последствия необходимо изменить нейронную сеть таким образом, чтобы расширить её репрезентативные способности, что позволит обеспечить запоминание множества навыков. Допустив возможность объединения нескольких стратегий, возникает следующий вопрос, связанный со способом извлечения ранее полученных знаний по требованию агента. В попытке решения проблем многофункциональности, «забывания» и селекции навыков, были предложены несколько подходов.

Наиболее популярным является иерархический подход, при котором формируются отдельные низкоуровневые навыки, управляемые высокоуровневым менеджером, осуществляющим выбор той или иной стратегии для конкретной ситуации [6]. Проблема забывания и многофункциональности в нём решается путём выделения под каждую стратегию отдельной глубокой нейронной сети, с объединением их под управлением сети-селектора, которая осуществляет выбор требуемого навыка в зависимости от значений входных параметров. Его основными недостатками являются: массивность архитектуры, сложность обучения системы, поскольку присутствует множество уровней, связанная с ней проблема качества выбора, поскольку и политики и менеджер обучаются на данных одновременно и сложность формирования вознаграждения, что прямо влияет на качество и производительность, как менеджера, так и политик.

Подход «смесь экспертов» (*Mixture of Experts, MoE*) представляет собой метод машинного обучения, разделяющий вычисления между совокупностью специализированных подсетей, так называемых экспертов [7, 8]. В данном подходе не используется единая монолитная модель, а производится декомпозиция задачи на подзадачи, делегируемые экспертам. Архитектура *MoE* состоит из множества ней-

ронных сетей и сети-маршрутизатора, определяющей соответствие экспертов токенам входных данных. В результате модель способна эффективно выполнять множество задач, поскольку группы экспертов обрабатывают различные аспекты входных данных (специализация). Подход МоЕ, помимо обучения сетей-экспертов, нуждается в настройке маршрутизатора, который осуществляет выбор соответствующих сетей, путём генерации скрытого вектора вероятностей. Их совокупная настройка может быть нестабильной, к тому же для обеспечения отсутствия «пустых» экспертов необходимо производить регуляризацию.

Дистилляция представляет собой ещё один из возможных способов решения проблемы многозадачности обучения [9, 10]. Его основная идея заключается в том, чтобы первоначально обучить специализированные политики, соответствующие некоторым задачам, после чего на их основе произвести обучение одной студент-политики. Преимуществом данного подхода является способность объединения знаний нескольких обученных экспертов в одной стратегии (одна нейронная сеть). Основным недостатком являются значительный размер результирующей политики и потеря нюансов, присущих первоначальным стратегиям. Так же, для подхода необходимо хранилище обучающих данных, содержащее выборки для всех решаемых задач, что во многих случаях невыполнимо. Применение дистилляции способно объединить множество стратегий внутри одной, но испытывает трудности, когда задачи абсолютно не похожи друг на друга. В результате чего, ради обобщения политик приходится жертвовать качеством, прямо влияющим на эффективность стратегии. Стоит отметить и большие временные затраты на обучение, множество манипуляций, не позволяющих выполнять процесс настройки в непрерывном режиме.

Прогрессивные нейронные сети (Progressive Neural Networks) представляют собой архитектуру, при которой для каждого локомоторного паттерна выделяется отдельный столбец-сеть, веса которого замораживаются после обучения, обеспечивая сохранность результата [11]. С добавлением новой задачи создаётся новый столбец, но при этом обеспечивается поддержка переноса ранее изученной информации по средствам боковых связей между ранее добавленными столбцами. Основным недостатком данного подхода является рост числа параметров при увеличении

количества задач. Идея прогрессивных нейронных сетей, связанная с динамическим добавлением столбца для новой задачи, способна привести к неконтрольному разрастанию структуры сети. Несмотря на способность сохранять в памяти решение всех требуемых задач, прогрессивным нейронным сетям для выбора столбца необходимо знание метки задачи, что в работе первоисточнике [11] указывается в качестве проблемы требующей дальнейшего рассмотрения. Другими словами, проблема маркировки навыков озвучена, но, на сегодняшний день, остаётся не решённой.

Большинство из рассмотренных подходов пытаются решить проблематику «забывания» использованием отдельной нейронной сети для каждой стратегии принятия решений. Возникают трудности с селекцией навыков, а в некоторых случаях, как в работе [11], данная проблема является не решённой. Архитектура нейросетевого аппарата большинства предложенных подходов является громоздкой и плохо управляемой. Для случая, предложенного в работе [11], при неточной классификации навыков, она способна динамически разрастись до значительных размеров, что может привести к огромному количеству задействованных параметров, что, в свою очередь, негативно влияет на использование ресурсов и время, отведённое на вычисления матричных операций. Поскольку основной задачей исследования является построение адаптивной системы управления локомоцией шагающего робота, где робот представляет собой устройство с ограниченными ресурсами, требование к минимизации их использования является приоритетным. Данный пункт так же актуален при построении систем искусственного интеллекта. Исходя из вышесказанного, следует вывод, что необходима такая архитектура нейросети, которая способна обеспечит запоминание множества навыков, без «забывания» предыдущих знаний, обладающая простым и понятным механизмом селекции стратегий и минимизирующая использование вычислительных ресурсов.

Предлагаемая архитектура нейронной сети

Очевидно, что попытка объединения нескольких стратегий путём использования немодифицированной нейронной сети приведёт к запоминанию последней изученной стратегии. Рассмотрев каждый из вышеописанных подходов, можно сделать вывод, что для обеспече-

ния сохранности полученных навыков рационально выделять отдельную сеть под конкретную задачу. Получив независимые модули, возникает новая проблема, связанная со способом их выбора и настройки. Нервная система биологического организма характеризуется фиксированным количеством нервных клеток. Головной мозг насекомых при относительно малом объёме способен выполнять множество разнообразных функций, включая различные локомоторные программы, паттерны которых подстраиваются под конкретные условия среды. Данный факт подтверждает существование способа объединения нескольких операций в ограниченном количестве нервных клеток. Пусть задана некоторая совокупность нейронов, именуемая *нейронным кластером*. Кластер состоит из множества групп нейронов, связанных в сети. Количество соответствующих групп внутри кластера характеризует его *программную ёмкость* W . Предлагаемая архитектура, по аналогии с ранее рассмотренными, строится на идее «одна задача – одна сеть». Её особенность заключается в том, что все группы располагаются в контексте одной полносвязной нейронной сети-кластера фиксированного размера, которые поочерёдно активируются в зависимости от условий, как представлено на рис. 1.

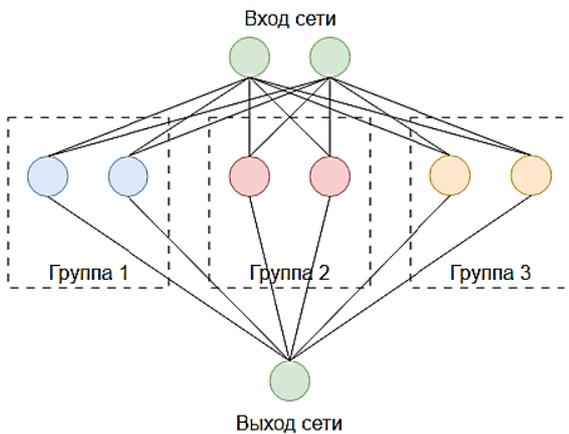


Рис. 1. Архитектура нейронной сети-кластера с двумя входами и одним выходом с программной ёмкостью $W = 3$

Использование групп для каждой операции в контексте одной общей сети позволяет решить проблему «забывания». Возникает новая задача, связанная с управлением выбором необходимой группы в конкретный момент времени, аналогичная той, что возникает в контексте работы [11]. Её можно разделить на два основных вопроса: способ кодирования групп и выбор требуемой группы нейронов по коду. Поскольку предлагаемый нейронный кластер обладает программной ёмкостью фиксированного размера, то можно воспользоваться обычной бинарной кодировкой, каждый код p которой будет соответствовать некоторой выполняемой программе. Например, кластер, способный обрабатывать 16 команд, для выбора конкретной операции будет оперировать с четырёхбитным словом. Данный управляющий сигнал может быть сгенерирован вышестоящим уровнем, что укладывается в концепцию иерархического подхода или же, для случая управления роботом, передаваться с пульта оператора.

В биологических скоплениях нейронов происходят последовательные активации различных участков одной и той же сети, что стимулирует выполнение некоторой функции. На этом принципе основана и предлагаемая архитектура. Иными словами, при поступлении кода, соответствующего некоторой группе нейронов, она становится активной, а все остальные нет. Для выполнения подобной манипуляции предлагается использовать подход, похожий на Dropout регуляризацию – процедуру, позволяющую случайным образом отключать нейроны сети в процессе обучения [12]. В случае работы с кластером нейронов, необходимо производить деактивацию всех групп кроме той, что была выбрана по средствам кода операции. Для этого введём в рассмотрение некоторую функцию $\Psi(p)$, которая ставит в соответствие код выбранной стратегии p , битовой маске, которая производит активацию нейронов, соответствующих группе, и деактивацию всех остальных. С учетом данной функции предлагается использовать следующую архитектуру однослойного нейронного кластера, представленного на рис. 2.

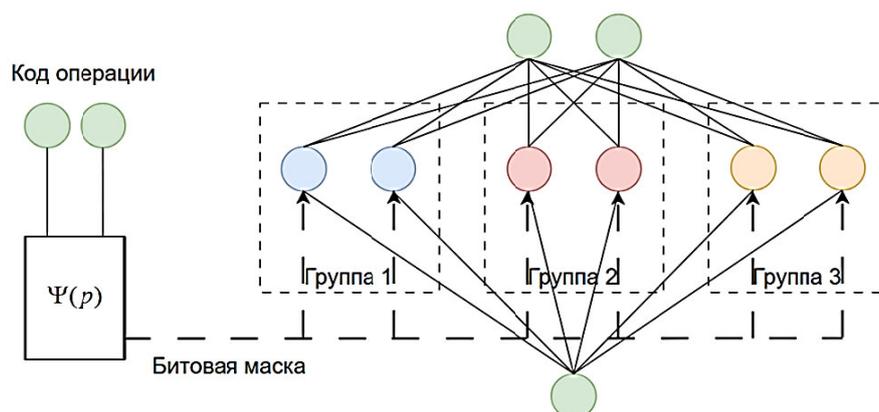


Рис. 2. Архитектура однослойного нейронного кластера с двумя входами и одним выходом и генератором регулирующей маски

Для реализации любой двигательной операции головному мозгу требуется выполнить множество действий. В оркестрации соответствующего процесса участвует глубоко расположенная часть мозга, называемая базальными ядрами [13, 14]. В работе [14], опубликованной в журнале Nature исследователями из Базельского университета и Института биомедицинских исследований имени Фридриха Мишера, проводилось исследование ретикулярной формации чёрной субстанции (Substantia nigra pars reticulata), являющейся выходом базальных ганглиев и отвечающей за генерацию сигналов, посылаемых в двигательные центры головного мозга. В работе [14] учёные производили регистрацию мозговой активности мышей в процессе кормления. В результате было выявлено, что некоторые из нейронов базальных ганглиев демонстрировали различную реакцию в зависимости от фазы выполняемого движения. При этом в исследовании подчёркивается точность настройки соответствующих сигналов, генерируемых нервными клетками. В работе учёные производили манипуляции над нейронами изучаемой области мозга посредством оптогенетических методов, в результате чего получилось доказать их контролируемую роль [13, 14]. Было отмечено, что функционирование базальных ганглиев можно сравнить с отлаженной системой светофоров, где каждый из них разрешает или запрещает выполнение в соответствии с запланированным действием. Данное поведение базальных нейронов указывает на особую систему кодирования, которая основывается на

движениях, причём с высокой степенью детализации [13, 14].

Исходя из вышесказанного, ранее введённая функция $\Psi(p)$ выполняет аналогичные функции, что и нейрон базального ганглия. В результате $\Psi(p)$ представляет собой *переключающий нейрон* – искусственный нейрон базального ганглия, обеспечивающий соответствие между кодом стратегии (равносильно движению) и маской регуляции выбора активной группы кластера (эквивалентно кодировке активации, генерируемой нейроном базального ганглия).

Таким образом, предложена архитектура однослойного нейронного кластера, отличающаяся наличием искусственного нейрона базального ганглия, где переключающий нейрон представляется в виде таблицы соответствия кода движения и требуемой активационной маски, и обеспечивающая возможность запоминания нескольких разных стратегий и переключение между ними. Благодаря использованию переключающих нейронов, становится возможным построение сложной многослойной архитектуры, каждый скрытый слой которой регулируется собственным переключающим нейроном, которые в совокупности образуют искусственный базальный ганглий. Пример двухслойной архитектуры с двумя входами и одним выходом, состоящей из двух групп нейронов, с использованием базального ганглия с двумя переключающими нейронами представлен на рис. 3.

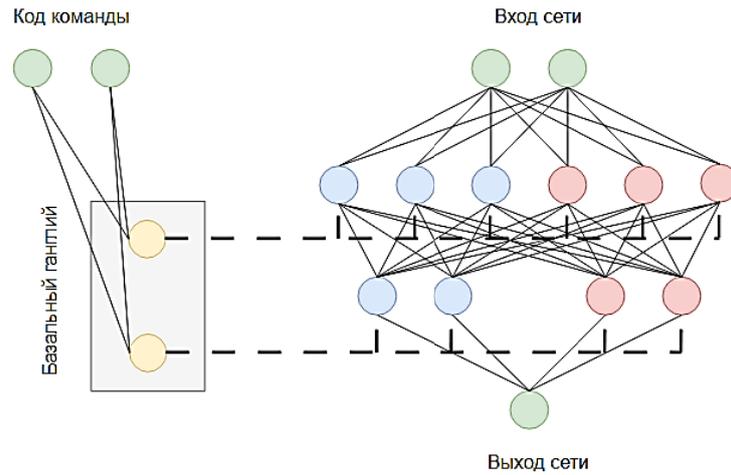


Рис. 3. Двухслойная архитектура нейронной сети с двумя входами и одним выходом, состоящая из двух групп нейронов, с использованием базального ганглия с двумя переключающими нейронами

Прогрессивные нейронные сети предназначены для решения проблемы «забывания» и позволяют использовать ранее полученные знания при обучении новых стратегий посредством боковых связей. На основании разработанной архитектуры полносвязной нейронной сети-кластера с использованием переключающих нейронов спроектируем прогрессивную нейронную сеть, предназначенную для запоминания множества стратегий с возможностью

их селекции и способностью применения предыдущих знаний при обучении новых стратегий. Без ограничения общности, рассмотрим сеть, состоящую из двух столбцов (программ), с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами, представленную на рис. 4. Пунктирной линией изображены боковые связи, передаваемые от столбца $k1$ к столбцу $k2$.

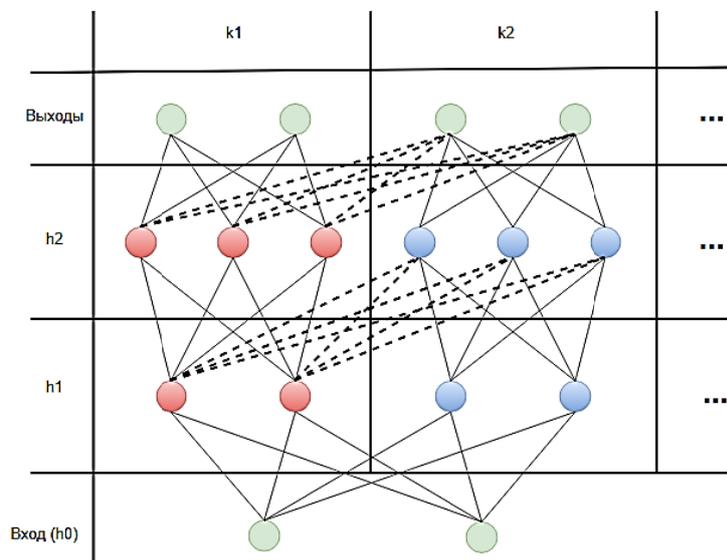


Рис. 4. Прогрессивная нейронная сеть, состоящая из двух столбцов (программ) с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами

Рассмотрев рис. 4, можно сделать вывод, что изображённая нейронная сеть представляет собой частично полносвязную, поскольку учитываются исключительно «правые» соединения (от $k1$ к $k2$). То же самое можно получить путём модификации полносвязной сети,

исключив «левые» связи (от $k2$ к $k1$) для каждого из слоёв.

Предлагаемая в настоящем исследовании архитектура (использование переключающих нейронов) позволяет решить проблему переключения между программами в работе [11], если помимо скрытых слоёв применить пере-

ключающий нейрон к слою выходов и ограничить количество запоминаемых кластером программ до строго определённого значения.

Таким образом, в зависимости от генерируемых масок нейронами искусственного базального ганглия, получится сформировать активную структуру сети в текущий момент времени для конкретной программы с учётом всех необходимых боковых связей предыдущих групп, с заморозкой обученных ранее параметров.

Стоит отметить, что при добавлении боковых связей и использовании подхода с переключающимися нейронами к решению проблемы работы [11], в процессе предсказания и обучения соответствующей общей сети возникнут дополнительные шаги.

В результате, прогрессивная нейронная сеть, основанная на архитектуре полносвязного нейронного кластера с использованием переключающихся нейронов и состоящая из двух столбцов (программ), с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами, пред-

ставлена на рис. 5. В работе [11] каждая сеть-программа (столбец k_i) обладает собственным набором выходов, поскольку авторы, предположительно, преследовали идею различия выходного вектора для каждой из решаемых задач. Поскольку в контексте основного исследования рассматривается построение системы управления локомоцией шагающего робота, где вход и выход имеют унифицированный интерфейс для всех локомоторных программ, то выходной слой для каждой группы будет один и его переключающий нейрон ликвидируется.

Прогрессивная нейронная сеть, основанная на архитектуре полносвязного нейронного кластера с использованием переключающихся нейронов и состоящая из двух столбцов (программ), с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами для случая унифицированных входа и выхода, представлена на рис. 6.

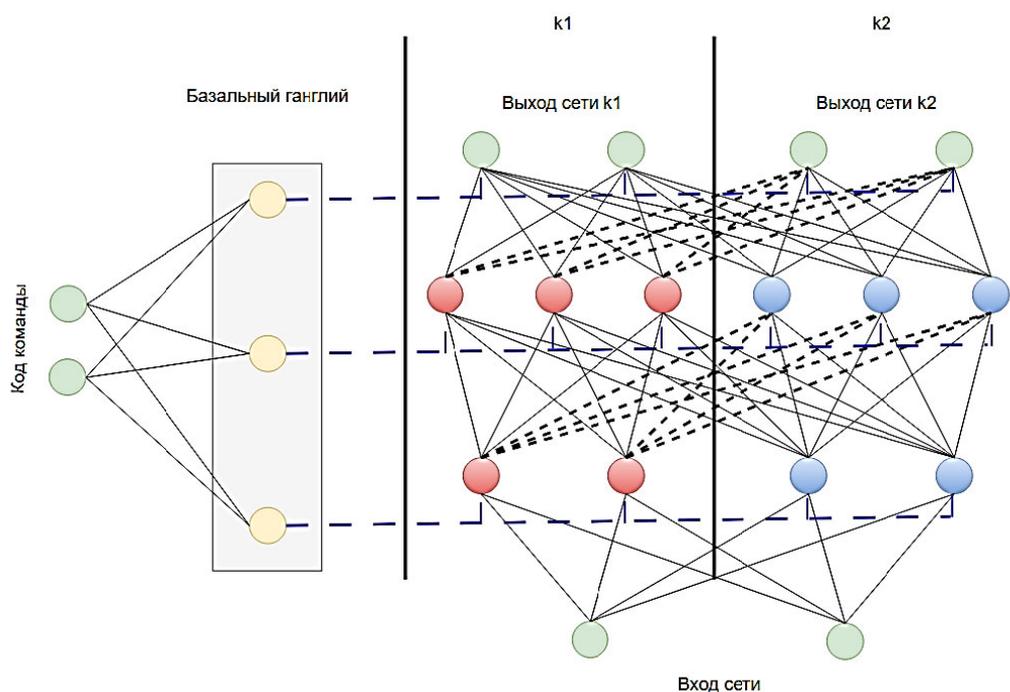


Рис. 5. Прогрессивная нейронная сеть, основанная на архитектуре полносвязного нейронного кластера с использованием переключающихся нейронов и состоящая из двух столбцов (программ), с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами

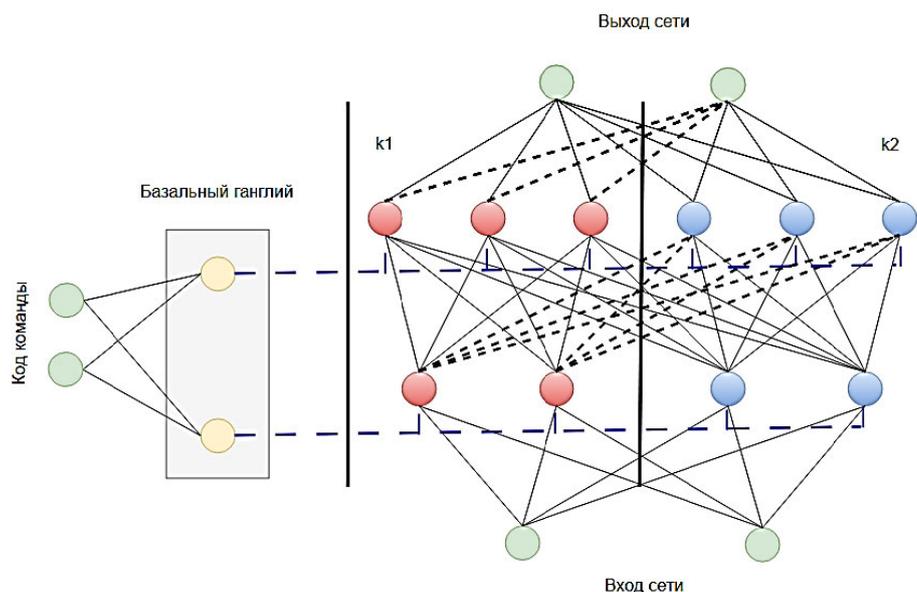


Рис. 6. Прогрессивная нейронная сеть, основанная на архитектуре полносвязного нейронного кластера с использованием переключающих нейронов и состоящая из двух столбцов (программ), с двумя скрытыми слоями, двумя входами и двумя выходами для случая унифицированного входа и выхода

Принципиальное отличие предлагаемой архитектуры от существующих аналогов (в частности, от варианта, предлагаемого в [11]) состоит в том, что используется одна полносвязная нейронная сеть, обеспечивающая многофункциональность посредством удобной системы переключения, осуществляемой переключающими нейронами, управляемыми кодами стратегий. В результате, в отличие от других, данная архитектура обеспечивает агента удобным механизмом управления стратегиями, решает задачу «забывания» и способна использовать предыдущие знания (в случае применения прогрессивных нейронных сетей) для обучения новых стратегий. Данной архитектуре не страшен эффект разрастания, при котором с каждой новой добавляемой политикой увеличивается количество параметров, что, в свою очередь, увеличивает размерность и время обработки вычислений в процессе предсказания и обучения, поскольку кластер характеризуется фиксированной программной ёмкостью. В процессе функционирования производится работа с одной нейронной сетью, в независимости от выбранной программы, в отличие от других аналогов, в которых функционирует множество разрозненных сетей, управляемых мастер-сетью. Предлагаемая архитектура способна обеспечить как полностью раздельное обучение групп, так и учёт боковых связей, как в прогрессивных нейронных сетях, благодаря генерации соответствующих

масок нейронами искусственного базального ганглия. В результате, при учёте боковых связей и использовании предлагаемой архитектуры нейронной сети, становится возможным использование преимуществ подхода прогрессивных нейронных сетей, связанных с использованием ранее изученной информации и удобного механизма регулирования, компактности и простоты предложенного нейросетевого аппарата. Было произведено тестирование предложенной архитектуры нейронной сети на примере сред CartPole-v0 и CliffWalking-v0 из пакета OpenAI Gym с учётом боковых связей и без. Сеть-кластер состояла из двух групп (программная ёмкость $W = 2$), каждая из которых строилась на двух скрытых слоях по 128 нейронов в каждом. В качестве алгоритма глубокого обучения с подкреплением использовался исполнитель-критик. Стратегии были закодированы бинарными кодами: «00» – CliffWalking-v0, «01» – CartPole-v0. В результате, нейронный кластер продемонстрировал запоминание стратегий, соответствующих имитационным средам. Эффекта «забывания» не наблюдалось.

Заключение

В контексте работы были решены следующие задачи:

- предложена архитектура нейронной сети, обеспечивающая увеличение репрезента-

тивной способности без эффекта «забывания», обладающая простой и эффективной системой управления выбором стратегий, а для случая использования прогрессивных нейронных сетей возможностью применения предыдущих знаний при настройке новых стратегий;

- введено понятие нейронного кластера – совокупности связанных между собой нейронов, характеризующихся программной ёмкостью – максимально возможным количеством программ, которое кластер способен запомнить;

- для селекции нейронных кластеров было предложено использовать переключающие нейроны, генерирующие битовые маски для активации выбранной операции, посредством битового кода;

- построены нейронные сети с отдельно обучаемыми группами и на основе прогрессивных нейронных сетей (обладающие боковыми связями), с решением проблемы маркирования столбцов (программ).

Полученные результаты могут использоваться для решения задач построения многофункционального искусственного интеллекта и интеллектуальной робототехники.

Литература

1. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.
2. Sim-to-real learning of all common bipedal gaits via periodic reward composition / J. Siekmann [et. al] // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2021. pp. 7309–7315.
3. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Структура системы управления шестиногого шагающего робота Гексабот // Вестник евразийской науки. 2016. Т. 8. № 5 (36). С. 103.

4. Learning agile and dynamic motor skills for legged robots / J. Hwangbo [et. al] // Science Robotics. 2019. Vol. 4. eaau5872. DOI: 10.1126/scirobotics.aau5872.

5. Azayev T., Zimmerman K. Blind hexapod locomotion in complex terrain with gait adaptation using deep reinforcement learning and classification // J. Intell. Robot. Syst. 2020. 99. Pp. 659–671. DOI: 10.1007/s10846-020-01162-8.

6. Imitate and repurpose: Learning reusable robot movement skills from human and animal behaviors / S. Bohez [et. al] // arXiv preprint arXiv:2203.17138, 2022. - URL: <https://arxiv.org/abs/2203.17138> (дата обращения: 12.10.2025).

7. Основы Mixture-of-Experts (MoE) - что это такое и как устроен. // llmstudio: [сайт]. 2025. llmstudio. URL: <https://llmstudio.ru/blog/mixture-of-experts-moe> (дата обращения: 20.10.2025).

8. GeRM: A Generalist Robotic Model with Mixture-of-experts for Quadruped Robot / W. Song [et. al] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates. 2024. pp. 11879–11886. DOI: 10.1109/IROS58592.2024.10801816.

9. Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the knowledge in a neural network. CoRR, abs/1503.02531, 2015. — URL: <https://arxiv.org/abs/1503.02531> (дата обращения: 15.09.2025).

10. Policy distillation / A. Rusu [et. al.] // abs/1511.06295, 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1511.06295> (дата обращения: 18.09.2025).

11. Progressive Neural Networks / A/ Rusu [et. al] // 2016. 10.48550/arXiv.1606.04671. URL: <https://arxiv.org/abs/1606.04671> (дата обращения: 22.09.2025).

12. Траск Э. Грокаем глубокое обучение: учебное пособие / Э. Траск. Санкт-Петербург.: Питер, 2021. 352 с.

13. Точный переключатель: как мозг управляет движениями. // Научная Россия: [сайт]. 2025. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/tochnyj-pereklyuchatel-kak-mozg-upravlaet-dvizheniami> (дата обращения: 28.10.2025).

14. Falasconi A., Kanodia H., Arber S. Dynamic basal ganglia output signals license and suppress forelimb movements // Nature. 2025. Vol. 644 pp. 749–758. DOI: 10.1038/s41586-025-09066-z

Поступила 03.11.2025; принята к публикации 26.01.2026

Информация об авторах

Кашко Василий Васильевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: vasya.kashko@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6146-9295

Олейникова Светлана Александровна – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0333-2313

Neural network architecture of a multifunctional agent based on deep reinforcement learning

V.V. Kashko, S.A. Oleynikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In the context of the practical application of deep reinforcement learning to the tasks of building artificial intelligence systems, including intelligent robotics, there is a problem associated with ensuring a multiplicity of behaviors under the control of a single agent. The agent based on deep reinforcement learning is based on a deep neural network capable of approximating only one decision-making strategy due to the low representational capacity of the neural network apparatus.

To date, there is no neural network architecture that allows you to quickly and efficiently learn several skills without losing knowledge. Based on this, this task is relevant, the solution of which is proposed in the context of this work. The object of the study is a deep neural network agent based on a deep learning algorithm with reinforcement. The subject is neural network architecture, which makes it possible to memorize a variety of strategies without losing previously acquired knowledge. The aim of the work is to build the architecture of an agent's neural network capable of combining many different strategies. The proposed architecture is based on the basic ideas of Mixture of experts and Progressive neural networks, combining the results of recent neuroscience research in the field of studying the reticular formation of the substantia nigra. Switching neurons are introduced in the work, which ensure the regulation of the activity of neural network regions in accordance with the required locomotor pattern on a principle similar to Dropout regularization, providing the network with the opportunity to learn a variety of skills. The obtained results are used to solve the problem of controlling the locomotion of a walking robot.

Key words: neural network; architecture; deep reinforcement learning; switching neuron; walking robot

References

1. Sutton R.S., Barto E.J. "Engagement with attachment: An introduction", Moscow: DMK Pres, 2020, 552 p.
2. Siekmann J., Godse Y., Fern A., Hurst J. "Sim-to-real learning of all common bipedal gaits via periodic reward composition," 2021 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. *IEEE*, 2021, pp. 7309–7315.
3. Fokin V.G., Shanygin S.V. "The structure of the control system of the Hexabot six-legged walking robot", *Bulletin of Eurasian Science (Vestnik evraziyskoy nauki)*, 2016, vol. 8, no. 5 (36), pp. 103.
4. Hwangbo J. et al. "Learning agile and dynamic motor skills for legged robots", *Science Robotics*, 2019, vol. 4, eaau5872.
5. Azayev T., Zimmerman K. "Blind hexapod locomotion in complex terrain with gait adaptation using deep reinforcement learning and classification", *J. Intell. Robot. Syst.*, 2020, no. 99, pp. 659–671.
6. Bohez S. et al., "Imitate and repurpose: Learning reusable robot movement skills from human and animal behaviors," arXiv preprint arXiv:2203.2022 art. 17138, available at: <https://arxiv.org/abs/2203.17138> (date of access: 12.10.2025).
7. The basics of Mixture-of-Experts (MoE) - what it is and how it works, available at: <https://llmstudio.ru/blog/mixture-of-experts-moe> (date of access: 02-06-25).
8. Song W. et al. "GeRM: A generalist robotic model with mixture-of-experts for quadruped robot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2024, pp. 11879-11886.
9. Hinton G., Vinyals O., Dean J. "Distilling the knowledge in a neural network", *CoRR*, *abs/1503.02531*, 2015, available at: <https://arxiv.org/abs/1503.02531> (date of access: 15.09.2025).
10. Rusu A. et al. "Policy distillation", *abs/1511.06295*, 2016, available at: <https://arxiv.org/abs/1511.06295> (date of access: 18.09.2025).
11. Rusu A. et al. "Progressive Neural Networks", 10.48550/arXiv.1606.04671, 2016, available at: <https://arxiv.org/abs/1606.04671> (date of access: 22.09.2025).
12. Trask E. "Grokaem deep learning", textbook, St. Petersburg: Peter, 2021, 352 p.
13. "Precise switch: how the brain controls movements", available at: <https://scientificrussia.ru/articles/tochnyj-pereklucatel-kak-mozg-upravlaet-dvizheniami>, (date of access: 18.09.2025).
14. Falasconi A., Kanodia H., Arber S. "Dynamic basal ganglia output signals license and suppress forelimb movements", *Nature*, 2025, no. 644, pp.749–758.

Submitted 03.11.2025; revised 26.01.2026

Information about the authors

Vasiliy V. Kashko, postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vasya.kashko@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6146-9295

Svetlana A. Oleynikova, Dr. Sci. (Technical), professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0333-2313

Структура персистентного хранения данных в метаграфовой СУБД

Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается разработка структуры персистентного хранения многомерных метаграфовых структур данных в метаграфовой системе управления базами данных (СУБД) и утверждение принципиального решения и способов хранения и сериализации данных для соответствия приводимой модели данных. Предлагается расширенная метаграфовая модель данных, включающая понятия метавершин и метаребер. Описаны принципы реализации хранилища данных, основанного на сериализации сущностей в виде плоских файлов. Рассматривается принципиальная разница реестров, а также приводится пример в виде сжатого префиксного дерева. Приводится математическое описание используемой модели данных, основанной на определении метаграфа по Базу и Блэннингу, применение технологии GraphID (уникальных идентификаторов сущности) в хранимых данных, а также описывается работа различных реестров, использованных в рамках приведенной в статье архитектуры. Предложенная архитектура включает реестры для хранения узлов, ребер, фрагментов и атрибутов, организованные в виде сжатых префиксных деревьев, что обеспечивает эффективный и быстрый поиск и обработку хранимых данных. Также описывается организация реестров для хранения метаданных СУБД. Представленная информация продолжает и развивает наработки, полученные в предыдущих работах.

Ключевые слова: СУБД; графовые СУБД; метаграф; метаграфовая СУБД; архитектура СУБД

Введение

В работе [1] описывается необходимость разработки СУБД, основанной на метаграфовой модели данных. В ней производится сравнение существующих графовых СУБД и обзор их функциональных возможностей и выводятся предпосылки к созданию нового типа СУБД на основе возможных путей использования и недостатками существующих СУБД при их эксплуатации в сложных сценариях и при комплексных функциональных и нефункциональных требованиях.

В работе [2] описывается принципиальный проект метаграфовой СУБД и архитектура хранилища с указанием некоторых технических решений, принятых при ее проектировании и разработке. Нужно отметить, что, несмотря на существование некоторых подходов к разработке метаграфовой СУБД (например, с применением как традиционных реляционных баз данных, так и NoSQL-решений [3], реализацией управления метаописаниями данных [4], децентрализацией хранения [5, 6] и т. д.), они обладают определенными несовершенствами, связанными с использованием технологий, не предназначенных для построения сложных иерархических сетевых моделей данных.

Разрабатываемая СУБД требует реализации способа персистентного хранения многомерных метаграфовых структур. Целью данной

работы является разработка и утверждение принципиального решения и способов хранения и сериализации данных для соответствия описанной модели данных.

Используемая модель данных

Первое определение метаграфа дано Базу и Блэннингом [7]. Они определяют метаграф следующим образом:

$$MG = (V, VM, E), \quad (1)$$

где V – множество вершин метаграфа, VM – множество метавершин метаграфа, E – множество ребер метаграфа.

Каждая вершина в приводимом определении метаграфа в свою очередь определяется как некоторый набор атрибутов, т. е.

$$v_i = \{atr_k\}, v_i \in V, \quad (2)$$

где v_i – это вершина метаграфа из множества V , atr_k – атрибут, присущий этой вершине.

Ребро метаграфа может быть описано как:

$$e_i = (V_S, V_E, eo, \{atr_k\}), \quad (3)$$

$$e_i \in E, \quad eo = true, false,$$

где e_i – ребро метаграфа, V_S – вершина, из которой исходит ребро, V_E – вершина, куда ребро входит, eo – маркер ориентированности ребра и atr_k – атрибут из множества атрибутов, присущих ребру.

Фрагмент метаграфа определяется как:

$$MG_i = \{ev_j\}, \quad ev_j \in (V \cup E \cup MV), \quad (4)$$

где MG_i – фрагмент метаграфа, ev_j – элемент, принадлежащий множеству вершин, ребер или метавершин метаграфа.

Метавершина задается следующей формулировкой:

$$mv_i = (\{atr_k\}, MG_i), \quad mv_i \in MV, \quad (5)$$

где mv_i – это метавершина из множества метавершин метаграфа.

Таким образом, метавершина, являясь в то же время полноценной вершиной самой по себе, обладает двумя существенными особенностями:

- она обладает собственным набором атрибутов, который определяет ее как вершину;
- она включает в себя фрагмент метаграфа, который обладает скрытыми связями и атрибутами элементов в нем.

Свойство, по которому метавершина обладает собственным набором атрибутов, не определяемых суммой атрибутов элементов фрагмента, называется эмерджентностью метаграфа. Эта особенность является отличительным преимуществом метаграфа перед другими моделями данных [3, 4].

Модель метаграфа, используемая в разрабатываемой СУБД, вводит дополнительно понятие метаребра:

$$me_i = (\{atr_k\}, MG_i), \quad me_i \in ME, \quad (6)$$

где ME – множество метаребер метаграфа.

Таким образом, ребро становится полноценной сущностью, которая обладает своей эмерджентностью, но кроме этого и дополнительным свойством – способностью отражать связи между узлами.

Формулировка метаграфа в таком случае становится следующей:

$$MG = (V, MV, E, ME). \quad (7)$$

А фрагмент метаграфа определяется как $MG_i = \{ev_j\}, \quad ev_j \in (V \cup E \cup MV \cup ME). \quad (8)$

Принципиальная реализация хранилища

Для хранения и обработки метаграфа в разрабатываемой СУБД необходимо описать и реализовать структуру данных, которая будет записана на жесткий диск вычислительного устройства, где эксплуатируется СУБД. Современные вычислительные системы предлагают оперирование исключительно плоскими файлами, поэтому итоговые данные, которые хра-

нит СУБД, также являются набором плоских файлов различной структуры [5, 6].

Описываемая модель данных утверждает 4 типа сущностей, составляющих метаграф:

1. узлы;
2. ребра;
3. фрагменты;
4. атрибуты.

Для каждой сущности необходим отдельный реестр, в котором хранятся сериализованные данные об этой сущности. Реестр может состоять из нескольких файлов, где один – основной, в котором ведется учет сущностей, а остальные – вспомогательные, обеспечивающие оптимальное хранение и обработку данных.

В общем случае каждый реестр хранит в себе набор кортежей, описывающих отношение, которое задается как

$$(Gid, k_1, \dots, k_n) \rightarrow (x_1, \dots, x_i), \quad (9)$$

где Gid – это уникальный идентификатор GraphID сущности, (k_1, \dots, k_n) – признаки сущности, определяющие его первичный ключ, (x_1, \dots, x_i) – признаки сущности, описывающие ее аспекты в рамках моделируемых данных.

Множество признаков сущности определяется как

$$\{x_1, \dots, x_i\} \in V \cup E \cup F \cup A \cup S, \quad (10)$$

где V – множество узлов в метаграфе, E – множество ребер в метаграфе, F – множество фрагментов в метаграфе, A – множество атрибутов в метаграфе, S – множество скалярных значений, которые описывают аспекты сущностей.

При этом $\{k_1, \dots, k_n\} \in S$, таким образом, ключ могут формировать только идентификаторы GraphID и скаляры.

Использование GraphID в хранимых данных

Признаки, которые являются другими сущностями, в используемых структурах данных задаются как GraphID сущностей, на которые они указывают [6]. Для корректного хранения идентификатора используется его сериализация в 64-битное целое беззнаковое число по структуре, показанной на рис. 1 (вертикаль – номер октета в числе, горизонталь – номер разряда в октете).

На рисунке видно, что область размером с 32-битное целое число занимает поле EntityID, показывающее порядковый номер сущности в реестре, поле EntityType занимает 4 бита, а поле MachineID занимает 8 бит. Таким образом,

остается неиспользованной сервисная область с 0 по 7 разряд в 0 и 1 октетах и с 0 по 3 разряд в октете номер 2. Эту область впоследствии можно использовать для расширения объема информации, хранимой в GraphID.

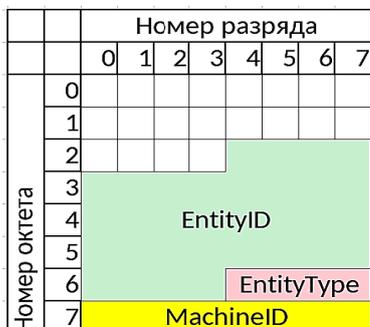


Рис. 1. Структура сериализации GraphID в целое число

Принципиальная реализация реестров

Каждый реестр в СУБД представлен в виде файла или набора файлов вида ключ-значение, где ключ однозначно определяет содержимое значения.

Ключ в любом из реестров – это байтовая последовательность, как правило, являющаяся сериализованным GraphID (исключение составляет только реестр атрибутов). Значением

всегда является кортеж из всех признаков сущности в виде последовательности байт.

Данные в реестрах хранятся в виде сжатого префиксного дерева, важной особенностью которого является оптимальное хранение строк со сложностью поиска $O(k)$, где k – максимальная длина хранимой строки. Таким образом, набор ключей реестра формирует дерево, в листовых узлах которого хранятся указатели на конкретные записи в файле данных реестра. Пример такого дерева представлен на рис. 2.

В случае, представленном на рис. 2, ключами являются последовательности "00111", "11100" и "11110". При поиске происходит проход в глубину по дереву с сопоставлением суммарного префикса всех узлов искомому ключу. При нахождении полного соответствия искомому ключу в листовом узле происходит обращение к области данных, указатель на которую хранится в этом узле.

Вставка ключа в дерево происходит в глубину по префиксным узлам, соответствующим ключу. При нахождении листового узла, префикс которого соответствует префиксу ключа, узел с ключом вставляется на том же уровне, что и найденный узел, а указатель на запись данных, соответствующих ключу, добавляется к новому узлу.

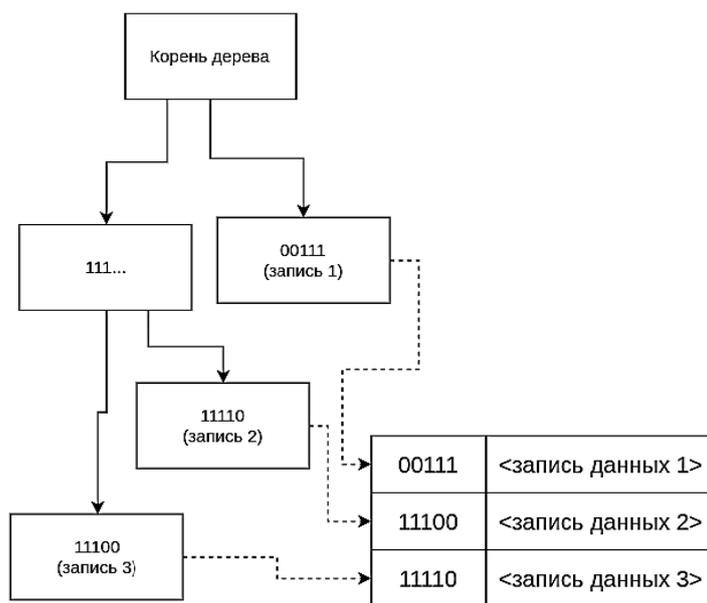


Рис. 2. Хранение данных реестра в виде сжатого префиксного дерева

Реестр узлов

Узлы являются самостоятельной сущностью, не зависящей от существования ни одной другой сущности в базе данных. Таким обра-

зом, они обладают наименьшим количеством признаков среди остальных сущностей.

Узлы хранятся в соответствующем реестре в виде набора отношений вида

$$Gid \rightarrow (fald, aflD), \quad (11)$$

где Gid – это идентификатор GraphID узла, $fald$ – идентификатор GraphID первого атрибута в двусвязном списке атрибутов узла (способ хранения и обработки атрибутов будет изложен в соответствующем разделе статьи), $aflD$ – идентификатор фрагмента, который привязан к узлу (является вложенным в него).

Как было ранее сказано, указатели на другие сущности хранятся сериализованными в 64-битное беззнаковое целое число, что приводит нас к структуре записи узла, представленной на табл. 1.

Итоговый размер записи данных об одном узле составляет 24 байта.

Таблица 1

Структура записи данных узла			
Атрибут	Gid	faId	aflD
Тип данных	uint64	uint64	uint64
Размер записи	8 байт	8 байт	8 байт

Реестр ребер

Ребра являются сущностью, которая зависит от существования узлов, являющихся источником и реципиентом ребра. Это приводит к следующему виду отношений, хранимых в реестре ребер:

$$Gid \rightarrow (nflD, ntId, or, aflD, fald), \quad (12)$$

где Gid – идентификатор GraphID ребра, $nflD$ – идентификатор узла, из которого исходит ребро, $ntId$ – идентификатор узла, в который входит ребро, or – показатель ориентированности ребра, $aflD$ – идентификатор фрагмента, привязанного к ребру, $fald$ – идентификатор первого атрибута ребра.

Структура записи данных в реестре ребер представлена в табл. 2.

Таблица 2

Структура записи данных ребра						
Атрибут	Gid	nflD	ntId	or	aflD	faId
Тип данных	uint64	uint64	uint64	bool	uint64	uint64
Размер записи	8 байт	8 байт	8 байт	1 байт	8 байт	8 байт

Итоговый размер записи в реестре ребер составляет 49 байт.

Реестр фрагментов

Фрагмент является многомерной сущностью, которая требует реестра, состоящего из

нескольких записей данных. Для определения структуры этих записей необходимо определить отношение, описываемое реестром фрагментов.

Отношения, которые описывают фрагмент метаграфа, задаются следующим образом:

$$Gid \rightarrow (eId, \{n_1, \dots, n_i\}, \{e_1, \dots, e_j\}), \quad (13)$$

где Gid – это идентификатор фрагмента, eId – идентификатор сущности, к которой привязан фрагмент, $\{n_1, \dots, n_i\}$ – множество узлов, включенных в фрагмент, $\{e_1, \dots, e_j\}$ – множество ребер, включенных в фрагмент.

Как видно, ребра отдельно от узлов, в которые они входят и из которых они исходят, могут быть включены в отдельный фрагмент, что соответствует модели данных, используемой в СУБД.

Сам реестр фрагментов можно разделить на три составные части:

1. Словарь учета фрагментов;
2. Словарь включения узлов во фрагмент;
3. Словарь включения ребер во фрагмент.

Словарь учета фрагментов хранит записи о существовании фрагментов в СУБД, и он соответствует структуре отношений, задаваемых как $Gid \rightarrow (eId)$.

Тем временем словари включения узлов и ребер во фрагмент хранят отношения, определяемые следующим образом.

Для словаря включения узлов во фрагмент $(Gid, i) \rightarrow (nodeId)$, где i – это порядковый номер записи для каждого фрагмента в словаре, $nodeId$ – идентификатор включенного узла.

Для словаря включения ребер во фрагмент $(Gid, j) \rightarrow (edgeId)$, где j – это порядковый номер записи для каждого фрагмента в словаре, $edgeId$ – идентификатор включенного ребра.

Структуры записей, хранимых в реестре фрагментов, представлены в табл. 3-5.

Таблица 3

Структура записи словаря учета фрагментов		
Атрибут	Gid	eId
Тип данных	uint64	uint64
Размер записи	8 байт	8 байт

Таблица 4

Структура записи словаря включения узлов			
Атрибут	Gid	i	nId
Тип данных	uint64	uint64	uint64
Размер записи	8 байт	8 байт	8 байт

Таблица 5

Структура записи словаря включения ребер			
Атрибут	Gid	j	edgeId
Тип данных	uint64	uint64	uint64
Размер записи	8 байт	8 байт	8 байт

Реестр атрибутов

В разрабатываемой СУБД атрибуты хранятся и обрабатываются как двусвязный список, где сущность имеет указатель на первый атрибут в списке, а каждый атрибут хранит указатель как на сущность, так и на предыдущий и следующий атрибут в списке. Тем самым, зная один атрибут, можно получить их полный набор и саму сущность, которой они соответствуют. Реализуется хранение атрибутов в реестре атрибутов при помощи задания следующего отношения:

$$(atName, Gid) \rightarrow (paId, naId, eId, at, v), \quad (14)$$

где *atName* – имя атрибута, *paId* – идентификатор предыдущего атрибута в списке, *naId* – идентификатор следующего атрибута в списке, *eId* – идентификатор сущности, аспект которой отражает атрибут, *at* – тип атрибута, *v* – значение атрибута в виде последовательности байт.

Ключом в реестре фрагментов является кортеж из имени атрибута и его GraphID в виде числа, конкатенированных в последовательность байт. Таким образом, для всех атрибутов различных сущностей, имеющих одинаковое имя, префикс ключа всегда будет именем атрибута, что позволяет найти в дереве ключей все записи данных атрибутов для различных сущностей за минимальное количество операций.

Структура записи данных реестра атрибутов показана на табл. 6.

Таблица 6

Структура записи реестра атрибутов							
Атрибут	atName	Gid	paId	naId	eId	at	v
Тип данных	text	uint64	uint64	uint64	uint64	int8	bytes
Размер записи	до 128 байт	8 байт	8 байт	8 байт	8 байт	1 байт	

Итоговый размер записи зависит от значений атрибутов *atName* и *v*, и в худшем случае может составить 177 байт на хранения метаинформации об атрибуте плюс размер самого значения атрибута.

Реестр метаданных

Разрабатываемая СУБД поддерживает словарь метаданных, в котором хранится информация о схеме данных, способе физического хранения информации в СУБД, местоположении файлов с данными, правах доступа и актуальных настройках СУБД.

В этом словаре всегда хранятся отношения вида *key* → (*v*), где *key* – это наименование конкретного значения в словаре метаданных СУБД, *v* – значение этой переменной метаданных. И *key* и *v* являются последовательностью байт, формируемой в зависимости от характера хранимых метаданных.

Заключение

В данной работе предложен принцип персистентного хранения многомерной метаграфовой структуры данных в виде набора кортежей, записываемых в плоские файлы, что позволяет эксплуатировать СУБД с использованием принятых современных средств хранения и обработки данных.

Предложена расширенная метаграфовая модель данных с применением метавершин и метаребер, описаны принципы реализации хранилища данных.

Также приведено математическое описание используемой модели данных с применением GraphID, описана принципиальная разница и работа реестров узлов, ребер, фрагментов, атрибутов и метаданных.

Литература

1. Анализ графовых систем управления базами данных / Д.Р. Никольский [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Т. 19. № 6. 2023. С. 13-20.
2. Архитектура СУБД, использующей метаграфовую модель данных / Д.Р. Никольский [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 20. № 2. 2024. С. 29-34.
3. Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases / V.M. Chernenkiy [et. al] // Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. 2018. Vol. 2277. P. 82-89.
4. The principles and the conceptual architecture of the metagraph storage system / V.M. Chernenkiy [et. al] // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: 20th International Conference. Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 1003. P. 73-87.
5. Distributed Metagraph DBMS Based on Blockchain Technology / A.A. Sukhobokov [et. al] // Natural and Technical Sciences. 2021. Vol. 7. P. 201-209.

6. Method of storing metagraph data model in PostgreSQL DBMS / I.A. Erokhin [et. al] // Artificial Intelligence in Management. Control, and Data Processing Systems,

Proceedings of the All-Russian Scientific Conference IIASU'22. Vol. 1. 2022. P. 348-351.

7. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and Their Applications. NY: Springer New York, 2007. 172 p.

Поступила 27.10.2025; принята к публикации 26.01.2026

Информация об авторах

Никольский Даниил Романович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikolsky.dan@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4940-9838

Барабанов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

A method for persistent data storage in a meta graph database

D.R. Nikolskiy, V.F. Barabanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This article is devoted to the development of a persistent storage structure for multidimensional metagraph data structures in a metagraph database management system (DBMS) and the approval of a fundamental solution and methods for storing and serializing data to comply with the presented data model. Within the framework of this work, an extended metagraph data model is proposed, incorporating the concepts of metavertices and metaedges. The principles of implementing a data warehouse based on the serialization of entities in the form of flat files are described. The fundamental difference between registries is considered, and an example in the form of a compressed prefix tree is given. A mathematical description of the data model used, based on the definition of a metagraph according to Baz and Blanning, the application of GraphID technology (unique entity identifiers) in the stored data are provided, and the operation of various registries used within the framework of the architecture presented in the article is described. The proposed architecture includes registries for storing nodes, edges, fragments, and attributes, organized in the form of compressed prefix trees, which ensures efficient and fast searching and processing of stored data. The paper also describes the organization of registries for storing DBMS metadata. This article continues and builds on the work presented in previous works.

Key words: DBMS; graph DBMS; metagraph; metagraph DBMS; DBMS architecture

References

1. Nikolskiy D.R., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Kovalenko S.A., Nuzhny A.M. "Analysis of graph database management systems", *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 13-20.
2. Nikolskiy D.R., Barabanov V.F., Safronov V.V., Nuzhny A.M., Chernikov V.N. "Architecture of a DBMS using a metagraph data model", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 29-34.
3. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A., Larionov V. "Storing metagraph model in relational, document-oriented, and graph databases", *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*, 2018, vol. 2277, pp. 82-89.
4. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Revunkov G.I., Andreev A.M., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A. "The principles and the conceptual architecture of the metagraph storage system", *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: 20th International Conference. Communications in Computer and Information Science*, 2019, vol. 1003, pp. 73-87.
5. Sukhobokov A.A., Trufanov V.A., Stolyarov Y.A., Sadykov M.R., Elizarov O.O. "Distributed metagraph DBMS based on blockchain technology", *Natural and Technical Sciences*, 2021, vol. 7, pp. 201-209.
6. Erokhin I.A., Grunin N.S., Molchanov A.V., Belousov E.A., Gapanyuk Y.E. "Method of storing metagraph data model in PostgreSQL DBMS", *Artificial Intelligence in Management. Control, and Data Processing Systems, Proceedings of the All-Russian Scientific Conference IIASU'22*, 2022, vol. 1, pp. 348-351.
7. Basu A., Blanning R.W. "Metagraphs and their applications", NY: Springer New York, 2007, 172 p.

Submitted 27.10.2025; revised 26.01.2026

Information about the authors

Daniil R. Nikolskiy, postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolsky.dan@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4940-9838

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Каскадно-селективная асинхронная модель на основе мультиагентных систем

А.Л. Марыщенко, А.Д. Данилов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Анотация. На данный момент в научной литературе представлено множество работ, посвящённых развитию и анализу эволюционных мультиагентных вычислительных систем. В рамках этих исследований особое внимание уделяется вопросам организации таких систем, способам взаимодействия между агентами и методам их адаптации к изменяющимся условиям. Эволюционные механизмы позволяют агентам не только координировать свои действия, но и корректировать стратегии поведения на основе накопленного опыта. Благодаря этому мультиагентные системы находят широкое применение в задачах, связанных с оптимизацией, прогнозированием и автоматизированным управлением. Рассматривается модель, использующая эти принципы наряду с асинхронным подходом, а также описывается ряд сопутствующих сущностей, необходимых для корректного функционирования данной системы: субагент, агент, база знаний, коэффициенты интерпретации и дивергенции. Приводятся схемы, описывающие устройство и алгоритм работы агентно-субагентного мотива, паттерна взаимодействия субагента с вышестоящим агентом, а также приведен вариант каскадно-селективной асинхронной модели. После описания версии каскадно-селективной асинхронной модели предлагается формат реализации описанного шаблона для дерева решений и в задачах оптимизации, таких как настройка параметров машинного обучения.

Ключевые слова: мультиагентные системы; селективный отбор; массово-конкурентные системы; многоуровневая архитектура; асинхронное программирование

Введение

Актуальные исследования показывают, что включение эволюционных принципов в архитектуру мультиагентных систем способствует более рациональному распределению вычислительных ресурсов, увеличивает их устойчивость к внешним воздействиям и повышает качество принимаемых решений, особенно в условиях неопределённости [1, 2, 3, 4, 5].

Помимо этого, в последние годы активно изучаются мультиагентные системы, в основе которых лежит асинхронный подход. Это направление подтверждается большим количеством научных публикаций и практических разработок [3, 6]. В современных мультиагентных фреймворках асинхронность уже является стандартной характеристикой, поскольку она позволяет повысить гибкость и эффективность работы системы. Особенно это актуально для тяжеловесных агентов, выполняющих ресурсоёмкие вычисления, анализ больших данных или принятие решений на основе сложных алгоритмов [7, 8, 9].

Разделение вычислительных потоков обеспечивает высокую производительность системы, снижая задержки и повышая её адаптивность к изменениям внешней среды [10]. Таким

образом, асинхронный подход не только органично вписывается в концепцию мультиагентных систем, но и способствует их дальнейшей эволюции, повышая их масштабируемость, надёжность и скорость обработки данных.

В данной статье будет рассматриваться гибридная модель, основанная на этих принципах. В её основе лежит принцип селективного отбора, развернутый на массово-конкурентную систему из множества интеллектуальных агентов.

Элементы модели

1) Субагент - интеллектуальный агент, который выполняет специфические задачи по общей цели, который может самостоятельно принимать решения и действовать, опираясь на опыт системы [11].

2) Агент - интеллектуальный агент, который выполняет роль менеджера и агента селекции субагентов. Он определяет распределение, направленность и силу мутаций субагентов своей подсистемы [12].

3) База знаний (БЗ) представляет собой организованное хранилище информации о результатах деятельности группы агентов или субагентов, а также данные о состоянии среды. База знаний включает в себя данные о принятых решениях и других параметрах, если они

необходимы для функционирования подсистемы или системы в целом [1, 13, 14, 15].

4) Коэффициент интерпретации (k_i) – это параметрическая матрица, сформированная вышестоящим агентом для группы субагентов, отражающая обобщенный успешный опыт, накопленный системой в ходе её функционирования, который был преобразован агентом в численные параметры. Он используется субагентом при формировании управляющих решений и обновляется вышестоящим агентом на основе результатов предыдущих действий. За счёт этого система получает возможность корректировать свои реакции на входные воздействия среды и адаптировать поведение субагентов в изменяющихся условиях.

5) Коэффициент дивергенции (k_{dn}) - это параметрическая матрица, сформированная вышестоящим агентом для конкретного субагента, характеризующая допустимую степень вариативности его поведения и выраженная вышестоящим агентом в численном виде. Данный коэффициент аналогично k_i представлен в

численном виде, но в отличие от него определяет интенсивность изменения стратегий субагентов при переходе к новым или слабо предсказуемым ситуациям. Посредством присвоения субагентам разного коэффициента дивергенции внутри группы обеспечивается баланс между сохранением эффективных решений и поиском альтернативных вариантов, что повышает адаптивные свойства всей системы.

Рассмотрим схему устройства мотива гибридной модели, а также алгоритм ее работы (рис. 1, 2).

Агентно-субагентная связь типа «один ко многим» представляет собой ключевой мотив (рекурсивно повторяющийся элемент сети) данной модели. Эту связь можно реализовать в виде многослойной структуры, где каждый слой агентов функционирует как слой субагентов для вышестоящих агентов. В такой конфигурации агенты будут соревноваться в селекции между собой, привнося в свою систему наиболее релевантные коэффициенты (рис. 3).

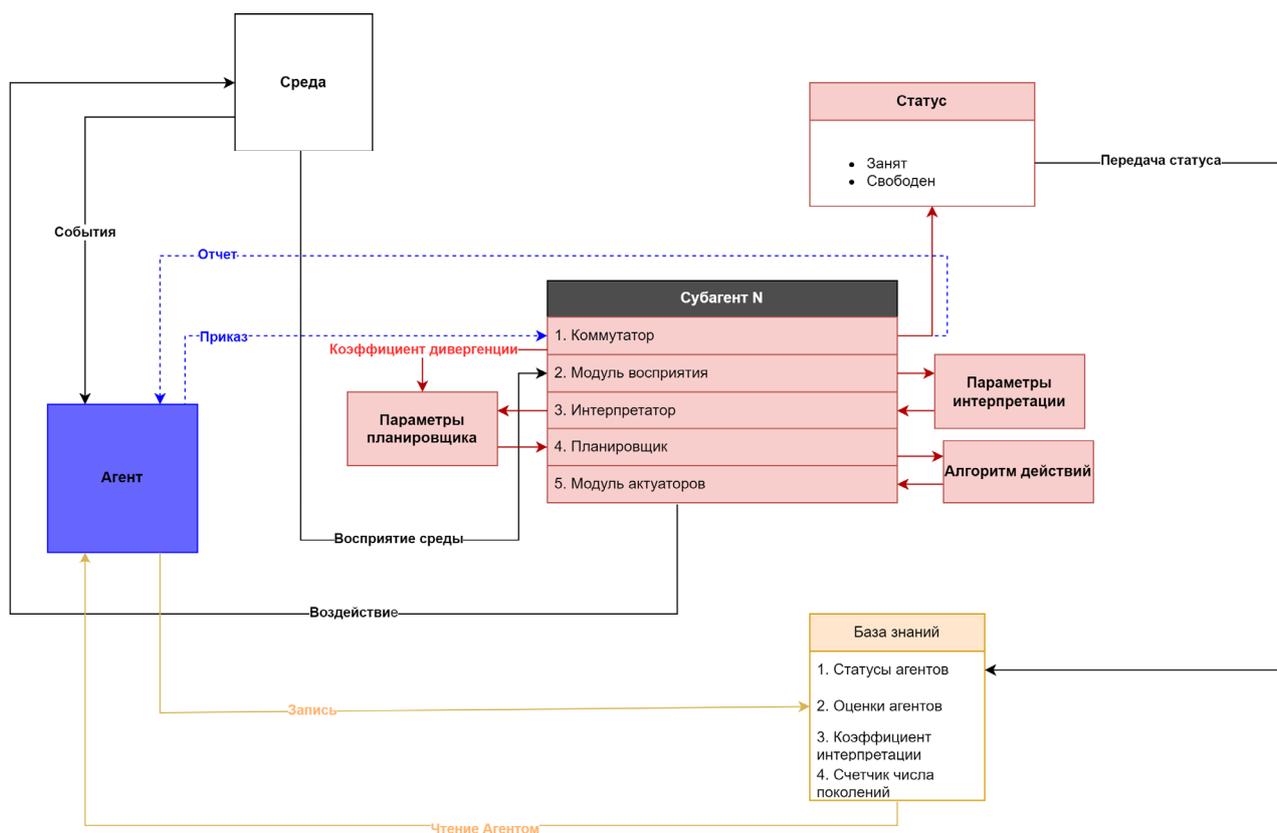


Рис. 1. Схема устройства агентно-субагентного мотива

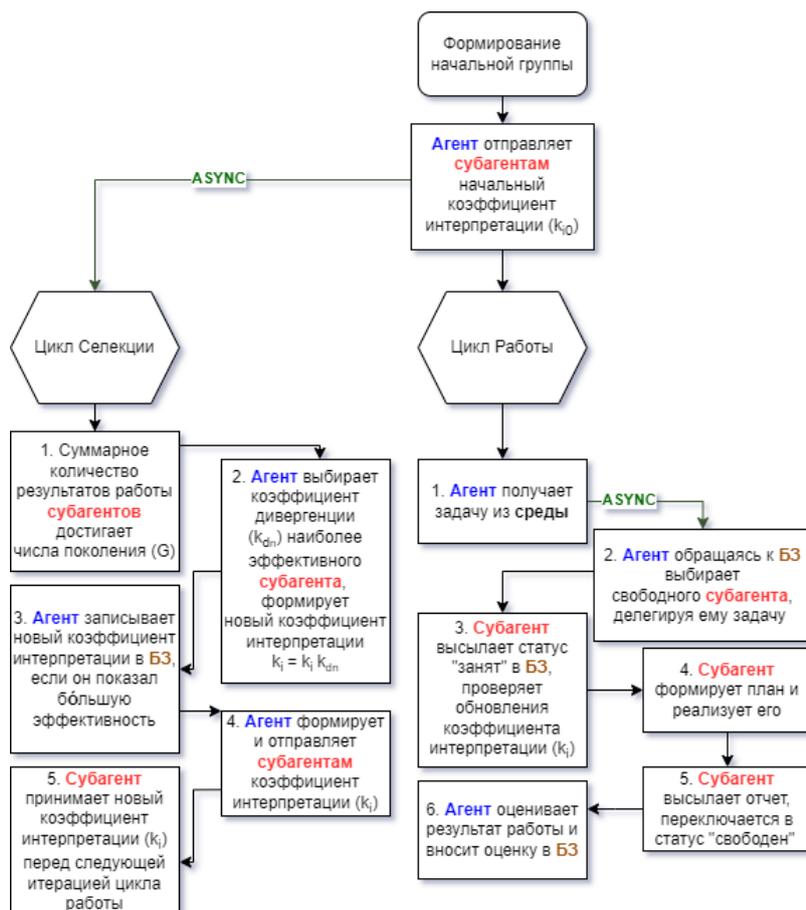


Рис. 2. Алгоритм работы агентно-субагентного мотива

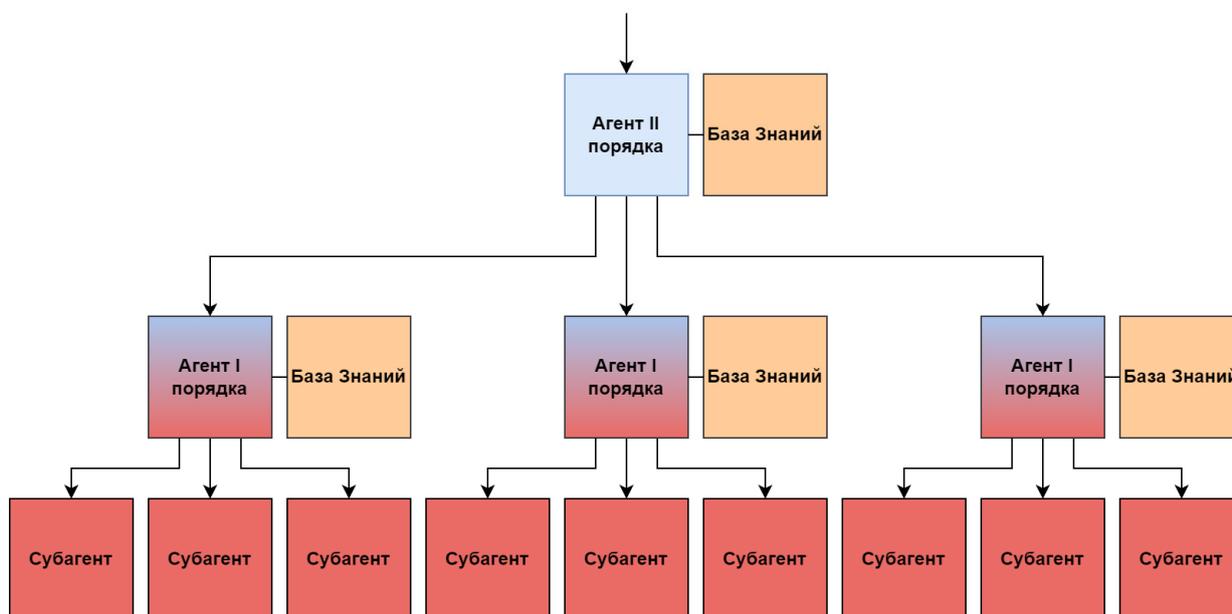


Рис. 3. Версия каскадно-селективной модели

Будучи абстрактным шаблоном построения архитектуры, предложенная модель может быть адаптирована к различным вариантам реализации как элементов интеллектуальных агентов, так и самих интеллектуальных агентов

в зависимости от контекста задачи. Например, в контексте реализации элемента “планировщик” через поведенческие деревья, коэффициенты интерпретации и дивергенции можно реализовать как набор параметров, корректирующих

вес каждой из ветвей дерева. Эти параметры будут влиять на определение приоритетности выбора определённой ветви в процессе принятия решений и вносить корректировки для устаревших или неэффективных стратегий отдельных агентов. Таким образом, коэффициенты на процесс планирования, помогая агенту выбирать наиболее оптимальные стратегии в зависимости от текущей ситуации.

В задачах оптимизации, таких как настройка параметров машинного обучения, модель может использовать коэффициенты, как системные входные параметры, определяющие важность различных признаков данных. В этом случае агенты будут взаимодействовать и корректировать веса признаков в процессе обучения, что позволит системе адаптироваться к меняющимся условиям и улучшать свою производительность [12, 16].

Стоит отметить, что предложенная гибридная модель, основанная на принципах селективного отбора и массово-конкурентных мультиагентных систем, демонстрирует высокую гибкость при решении сложных задач в условиях изменяющейся внешней среды. Интеграция асинхронного подхода и многоуровневой архитектуры способствует эффективному распределению вычислительных ресурсов и повышению производительности системы. Использование коэффициентов интерпретации и дивергенции обеспечивает динамическую корректировку поведения агентов и субагентов по средству обратной связи от остальной модели, что позволяет системе эволюционировать и оптимизировать свои стратегии на основе накопленного ею опыта. Благодаря своей абстрактной природе архитектура может быть применена в широком спектре задач, что открывает перспективы для дальнейших исследований и практических внедрений в области интеллектуальных вычислительных систем.

Заключение

В настоящей работе была предложена каскадно-селективная асинхронная модель, включающая детальное описание ее основных принципов и понятий: субагент, агент, база знаний, параметры адаптации (коэффициенты интерпретации и дивергенции).

Показано, что от использования асинхронных механизмов в сочетании с селективным отбором ожидается повышение адаптивности и эффективности распределения вычислительных

ресурсов, а также улучшение качества принимаемых решений в условиях неопределенности.

В дальнейших исследованиях предлагается расширить модель под задачи гибридного обучения, а также проанализировать её адаптацию к реальным распределенным системам с последующей доработкой механизмов самонастройки в сложных динамических средах.

Литература

1. Данилов А.Д., Саввин М.О., Карачевцев А.Е. Энергичные методы и протоколы репликации в распределенных системах и средах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 67-71.
2. Brewka, G., Ellmauthaler, S., Strass, H. Asynchronous Multi-Context Systems. arXiv preprint, 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.05367.pdf> (дата обращения: 25.02.2026).
3. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Эволюционное проектирование как инструмент разработки многоагентных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 4. С. 26-36.
4. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, 1989. 412 p.
5. Boutilier C., Poole D. Computational Intelligence: A Logical Approach. Oxford University Press, 1999. 640 p.
6. Schut M.C., Spears W.M. Massively Concurrent Agent-Based Evolutionary Computing. Journal of Computational Science, 2015. pp. 153-162.
7. Vidal J.M., Durfee E.H. Asynchronous Coordination of Multiagent Plans in Domains with Temporal Constraints // Proceedings of the 6th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2007. pp. 157-164.
8. Chien S., Chen S. Asynchronous Multi-Agent Coordination for Real-Time Systems // Journal of Systems Architecture, 2006. Vol. 52, Issue 5, pp. 265-280.
9. Brazier F.M.T., Jonker C.M. Multi-Agent Systems Engineering // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2002. Vol. 5, pp. 185-200.
10. Zambonelli F., Omicini A. Coordination for Internet Application: Models, Technologies, and Applications. Springer, 2001. 235 p.
11. Wooldridge M., Jennings N.R. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995. 32 p.
12. Ferber J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1999. 509 p.
13. Данилов А.Д., Саввин М.О., Карачевцев А.Е. Исполнение SQL-подобных запросов в распределенных гетерогенных системах на базе Apache Hadoop // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 58-63.
14. Карачевцев А.Е., Данилов А.Д., Саввин М.О. Повышение производительности массово-параллельных СУБД с помощью адаптивного партиционирования данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 2. С. 7-11.
15. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, Third Edition. Prentice Hall, 2010. 1132 p.
16. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. pp. 1942-1948.

Информация об авторах

Марыщенко Артем Львович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: aprilneapril@yandex.ru

Данилов Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Cascade-selective asynchronous model based on multi-agent systems

A.L. Maryshchenko, A.D. Danilov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Currently, the scientific literature contains numerous works devoted to the development and analysis of evolutionary multi-agent computing systems. These studies pay particular attention to the organization of such systems, the methods of interaction between agents, and their adaptation to changing conditions. Evolutionary mechanisms allow agents not only to coordinate their actions but also to adjust their behavioral strategies based on accumulated experience. Due to this, multi-agent systems are widely used in problems related to optimization, forecasting, and automated control. A model utilizing these principles along with an asynchronous approach is considered, and a number of associated entities necessary for the correct functioning of this system are described: subagent, agent, knowledge base, interpretation coefficients, and divergence coefficients. Diagrams are presented describing the structure and algorithm of the agent-subagent motive, the pattern of interaction between the subagent and the superior agent, and a variant of the cascade-selective asynchronous model is presented. After describing a version of the cascade-selective asynchronous model, a format for implementing the described pattern is proposed for decision trees and in optimization problems such as tuning machine learning parameters.

Key words: multi-agent systems; selective pressure; massively concurrent systems; multi-level architecture; asynchronous programming

References

1. Danilov A.D., Savvin M.O., Karachevtsev A.E. “Energetic methods and replication protocols in distributed systems and environments”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 67–71.
2. Brewka G., Ellmauthaler S., Strass H. “Asynchronous Multi-Context Systems”, *arXiv preprint*, 2015. url: <https://arxiv.org/pdf/1505.05367.pdf> (25 February 2026)
3. Gladkov L.A., Gladkova N.V. “Evolutionary design as a tool for multi-agent system development”, *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences (Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie Nauki)*, 2019, no. 4, pp. 26–36.
4. Goldberg D.E. “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning”, Addison-Wesley, 1989, 412 p.
5. Boutilier C., Poole D. “Computational Intelligence: A Logical Approach”, Oxford University Press, 1999, 640 p.
6. Schut M.C., Spears W.M. “Massively concurrent agent-based evolutionary computing”, *Journal of Computational Science*, 2015. pp. 153–162
7. Vidal J.M., Durfee E.H. “Asynchronous coordination of multiagent plans in domains with temporal constraints”, *Proc. of the 6th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, 2007. pp. 157–164.
8. Chien S., Chen S. “Asynchronous Multi-Agent Coordination for Real-Time Systems”, *Journal of Systems Architecture*, 2006, vol. 52, issue 5, pp. 265–280.
9. Brazier F.M.T., Jonker C.M. “Multi-Agent Systems Engineering”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2002, vol. 5, pp. 185–200.
10. Zambonelli F., Omicini A. “Coordination for internet application: models, technologies, and applications”, Springer, 2001, 235 p.
11. Wooldridge M., Jennings N.R. “Intelligent agents: theory and practice. The knowledge engineering review”, 1995, 32 p.
12. Ferber J. “Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence”, Addison-Wesley, 1999, 509 p.
13. Danilov A.D., Savvin M.O., Karachevtsev A.E. “Execution of SQL-like Queries in distributed heterogeneous systems based on apache hadoop”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 58–63.
14. Karachevtsev A.E., Danilov A.D., Savvin M.O. “Improving the Performance of Massively Parallel DBMS through Adaptive Data Partitioning”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 2, pp. 7–11.
15. Russell S., Norvig P. “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice Hall, 2010, 1132 p.
16. Kennedy J., Eberhart R. “Particle swarm optimization”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, 1995, pp. 1942–1948.

Submitted 11.12.2025; revised 26.01.2026

Information about the authors

Artem L. Maryshchenko, postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: aprilneapril@yandex.ru

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Идентификация тепловых сигнатур объектов на свободной поверхности пористой среды

В.И. Рязских¹, И.Г. Дроздов¹, В.А. Хвостов², Е.А. Соболева¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Предлагается алгоритм идентификации тепловых сигнатур наземных объектов для их обнаружения и классификации тепловизионными системами на свободной поверхности пористой среды. Алгоритм включает в себя синтез геометрической 3D-модели объекта и поверхностного слоя пористой среды, на котором он расположен, математическую модель, описывающую нестационарные сопряжённые температурные поля в пористой среде и объекте, с учетом порозности, объемных долей жидкой и газообразной фаз поровой среды, условий теплообмена, а также теплофизических свойств твердого каркаса и фаз поровой среды. Модели через граничные условия уравнений сохранения энергии сопрягаются с моделью окружающей среды, позволяющей имитировать изменение температуры окружающего воздуха и интенсивность теплоотдачи от поверхности объекта и пористой среды. Вычислительные эксперименты показали адекватность описания закономерностей теплопереноса в заданной постановке задачи и подтвердили наличие максимума функции температурного контраста от времени. Предложенный подход может быть применён для решения различных задач: распознавание опасных объектов, оценка возможности их обнаружения тепловизионным методом, поиск оптимальных промежутков времени с максимальной чувствительностью к обнаружению объектов определённого класса.

Ключевые слова: тепловизионный контроль; математическое моделирование; теплоперенос

Введение

Тепловизионный мониторинг земной поверхности с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) широко внедряется в практику в контексте ликвидации наземных и заглубленных взрывных устройств, а также их определения их локализации [1, 2]. Использование композитных материалов в таких устройствах затрудняет использование методов электромагнитного зондирования [3, 4]. В случае отсутствия визуализации объекта альтернативой является инфракрасный (ИК) диапазон, регистрирующий тепловую картину земной поверхности и тепловизионные методы обнаружения объектов с помощью БЛА с оптическими и ИК-камерами, пригодными для дистанционного обнаружения мин [5, 6]. Использование тепловизионного метода требует наличия температурного контрастирования объекта на фоне окружающей среды, при этом температурный контраст проявляется в условиях неравновесного термодинамического состояния системы «объект – окружающая среда». Чувствительность тепловизионных методов зависит от различия в теплофизических свойствах материалов объекта и окружающей

среды, от состояния почвы (её состава, пористости и влажности) для заглубленных мин, а также от режима нагрева-охлаждения системы «объект – окружающая среда» [6, 7-9].

Целью работы является разработка алгоритма идентификации тепловых сигнатур на основе 3D-модели объекта и математических моделей, описывающих динамику теплообменных процессов в объекте и окружающей среде, а также проведение вычислительных экспериментов, демонстрирующих методику формирования тепловых сигнатур объектов в нестационарных условиях окружающей среды.

Математическая модель

Синтез математической модели объекта рассмотрен на примере противотанковой мины ТМ-65 и включает в себя геометрическую 3D-модель объекта в натуральную величину с выделением в отдельные вычислительные области элементов с разными теплофизическими параметрами (составные элементы корпуса, воздушные полости, взрывчатое вещество и т.д.), привязанные к каждой области расчетные зависимости, описывающие механизмы теплопереноса и сопряжения между собой и с окружающей средой.

Область D_1 кубической формы описывает окружающий мину грунт, область D_2 описывает совокупность составных частей мины (рис. 1а) и сопрягается с верхней поверхностью области D_1 . На рис. 1б представлены об-

ласти D_1, D_2 . Заданы граничные условия: Γ_1 – условие тепловой изоляции, Γ_2 – конвективный тепловой поток к окружающей среде, Γ_3 – тепловой контакт между пористой средой и составными частями мины (рис. 1б).

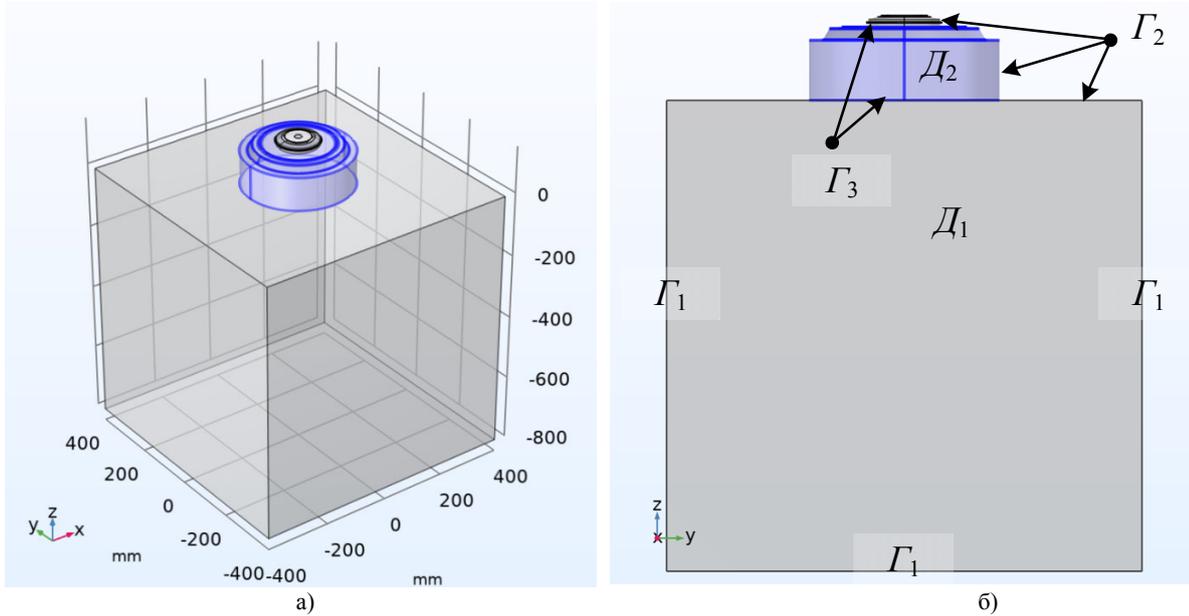


Рис. 1. 3D-модель противотанковой мины ТМ-65 и фрагмента пористой среды (а), расчетная схема (б)

Приняты следующие допущения: пористая среда несжимаема; поровая среда состоит из двух фаз («жидкость-газ» с индексами w для жидкости и a для газа) без фазовых переходов; теплоперенос в объекте и пористой среде осуществляется по механизму теплопроводности; между твёрдым каркасом пористой среды и поровой средой идеальный тепловой контакт; верхние поверхности обмениваются тепловой энергией с окружающей средой по конвективному механизму, а боковые поверхности адиабатны.

С учетом принятых допущений математические модели принимают вид

$$\begin{cases} (\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T_g), \\ \rho_{o,i} c_{p o,i} \frac{\partial T_{o,i}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{o,i} \nabla T_{o,i}), i = \overline{1..N}, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время, с;

$(\rho c_p)_{eff}, \rho_{o,i}$ – эффективные плотность и теплоемкость пористой среды и составных элементов объекта, Дж/(кг·К), кг/м³;

$T_g, T_{o,i}$ – температуры пористой среды и составных элементов объекта, К;

i – номер элемента;

N – число элементов;

$c_{o,j}$ – изобарная удельная массовая теплоемкость составных элементов объекта, Дж/(кг·К);

$\lambda_{eff}, \lambda_{o,j}$ – теплопроводности среды и составных элементов объекта, Вт/(м·К).

Характеристики пористой среды определяются её порозностью и влагосодержанием [10]

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_{eff} &= \varepsilon_p \rho_f c_{pf} + \theta \rho_s c_{ps} = \\ &= \varepsilon_p (\theta_w \rho_w c_{pw} + \theta_a \rho_a c_{pa}) + \theta \rho_s c_{ps}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_{eff} = \varepsilon_p \lambda_f + \theta \lambda_s = \varepsilon_p (\theta_w \lambda_w + \theta_a \lambda_a) + \theta \rho_s c_{ps}, \quad (3)$$

где ρ_f – плотность флюида, кг/м³;

c_{pf} – удельная теплоемкость флюида, Дж/(кг·К);

ε_p – порозность пористой среды;

$\theta = 1 - \varepsilon_p$ – пористость;

ρ_s – плотность твердого каркаса пористой среды, кг/м³;

θ_w, θ_a – объемные доли фаз w и a в пористой среде;

ρ_w, ρ_a – плотности фаз w и a , кг/м³;

c_{pw}, c_{pa} – удельные теплоемкости фаз w и a , Дж/(кг·К);

λ_w, λ_a – теплопроводности фаз w и a , кг/м³, Вт/(м·К).

Начальные условия $T_g|_{t=0} = T_{o,i}|_{t=0} = T_{st}$, где T_{st} – начальная температура сопряженной системы, К.

Граничные условия на Γ_1 : $\frac{\partial T_g}{\partial \bar{n}}|_{\Gamma_1} = 0$, на Γ_2 :

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T_g}{\partial \bar{n}}|_{\Gamma_2} = \alpha (T_g|_{\Gamma_2} - T_\infty), \text{ где } \bar{n} - \text{единичный}$$

нормальный к поверхности вектор, α – коэффициент теплоотдачи от поверхности изделия к окружающей среде, Вт/(м²·К), T_∞ – температура окружающей среды, на Γ_3 : $T_g = T_{o,i}$,

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T_g}{\partial \bar{n}} = \lambda_{o,i} \frac{\partial T_{o,i}}{\partial \bar{n}}.$$

Алгоритм идентификации тепловой сигнатуры

Формирование тепловой сигнатуры включает в себя следующие этапы:

1. Синтез 3D-модели объекта в натуральную величину с выделением отдельных вычислительных областей для каждого из конструктивных элементов объекта, а также фрагмента пористой среды.

2. Задание теплофизических свойств для всех областей составных элементов модели.

3. Задание механизмов теплопереноса в областях модели, а также между элементами модели и окружающей средой.

4. Дискретизация расчетной области на конечные элементы.

5. Задание методов интегрирования систем дифференциальных уравнений, формализующих физические процессы в расчетных областях.

6. Численное интегрирование систем дифференциальных уравнений, качественная оценка результатов, оценка сеточной сходимости и сравнение с результатами натурных экспериментов. Принятие решения о соответствии разработанных моделей и численных методов решения уравнений реальному объекту и возможности их использования для генерации тепловых сигнатур.

7. Вычислительные эксперименты с цифровым двойником объекта, позволяющие ими-

тировать его нахождение в неравновесном термодинамическом состоянии при заданных искусственно условиях окружающей среды.

8. Формирование температурных полей и графического материала в шкале тепловизора «цвет-температура поверхности».

Для реализации методики необходимы средства 3D-моделирования типа Компас 3D, Autocad и т.д., среды мультифизического моделирования типа Ansys Fluent, Comsol Multiphysics, а также конструктивные размеры и теплофизические свойства пористой среды и анализируемого объекта. В соответствии с алгоритмом реализуются возможные сценарии изменения температуры окружающей среды: нагрев атмосферного воздуха в утренние и дневные часы, охлаждение в вечерние и ночные часы, разные типы объектов и их положение (расположение на поверхности, частичное или полное заглубление).

Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент заключался в имитации непрерывного изменения температуры атмосферного воздуха, формализованной в математической модели граничными условиями на поверхности Γ_2 с варьированием порозности пористой среды, отношений объемных долей фаз поровой среды. В качестве объекта рассмотрена противотанковая мина ТМ-65 [11]. Решение задачи (1) – (3) осуществлено численно методом конечных элементов. Расчетная сетка состояла из 28960 элементов. Использован неявный решатель на основе формулы обратного дифференцирования (BDF) и метода Ньютона [12, 13].

В качестве модельных материалов приняты сталь, резина, воздух, тротил для мины, кварц для твердого скелета, вода и воздух для фаз поровой среды, параметры сред взяты из [14-16], коэффициент теплоотдачи оценивался по эмпирической зависимости [17]

$$\alpha = 9,3 + 0,058(T - 273,15). \quad (4)$$

Параметры вычислительного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры вычислительного эксперимента

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Изобарная удельная теплоёмкость объекта	$c_{o,i}$ сталь резина воздух тритил	460 1420 1007 1337	Дж/(кг·К)
2	Коэффициенты теплопроводности объекта	λ_o сталь резина воздух тритил	25 0,3 0,024 0,25	Вт/(м·К)
3	Плотность объекта	$\rho_{o,i}$ сталь резина воздух тритил	7800 1300 1,2 1600	кг/м ³
4	Изобарная удельная теплоёмкость твердого каркаса	c_s	2200	Дж/(кг·К)
5	Коэффициент теплопроводности твердого каркаса	λ_s	5	Вт/(м·К)
6	Плотность твердого каркаса	ρ_s	2000	кг/м ³
7	Изобарная удельная теплоёмкость воды	c_w	4200	Дж/(кг·К)
8	Коэффициент теплопроводности воды	λ_w	0,9	Вт/(м·К)
9	Плотность воды	ρ_w	1000	кг/м ³
10	Изобарная удельная теплоёмкость воздуха	c_a	1005	Дж/(кг·К)
11	Коэффициент теплопроводности воздуха	λ_a	0,022	Вт/(м·К)
12	Плотность твердого воздуха	ρ_a	1,25	кг/м ³
13	Температура окружающей среды	T_∞	263, 273, 283	К
14	Начальная температура	T_{st}	293	К
15	Коэффициент теплоотдачи	α	7, 11, 15	Вт/(м ² ·К)
16	Порозность	ε_p	0,1;0,5;0,9	безразм
17	объемная доля водной фазы	θ_w	0,1;0,5;0,9	безразм
18	Время охлаждения	t	13	ч

Результаты вычислительного эксперимента

В результате проведенных вычислительных экспериментов получены нестационарные поверхностные температурные поля (рис. 2а, 2б), а также динамика температурного контраста для моделируемого фрагмента грунта с расположенным на нем цифровым двойником мины на основе фиксации максимальной, минимальной температур и их разности (рис. 3).

Температурное поле на верхней поверхности повторяет форму мины и формирует кольцевые тепловые пятна, образующиеся на планарной проекции (рис. 2б). В изометрической проекции контурные линии объекта образуют эллипсы и тепловой портрет более сложной формы (рис. 2а).

На рис. 3 представлен график динамики изменения температурного контраста максимальной температуры на анализируемой по-

верхности T_{max} , минимальной температуры T_{min} , а также величины температурного контраста $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ на верхней поверхности в течение 13 часов непрерывного конвективного нагрева. Выбранный временной диапазон обусловлен приблизительным промежутком времени, в течение которого происходит повышение (снижение) температуры окружающей среды без её дальнейшего существенного изменения. График ΔT имеет выраженный максимум в районе 45 минут от начала эксперимента, что говорит о наличии промежутка времени, при котором тепловизионный метод обнаружения заданного объекта в конкретных термодинамических условиях имеет наивысшую чувствительность. Экстремум обусловлен различием инерции нагрева (охлаждения) составных частей анализируемого объекта и пористой среды, вследствие их разных теплофизических свойств и размеров.

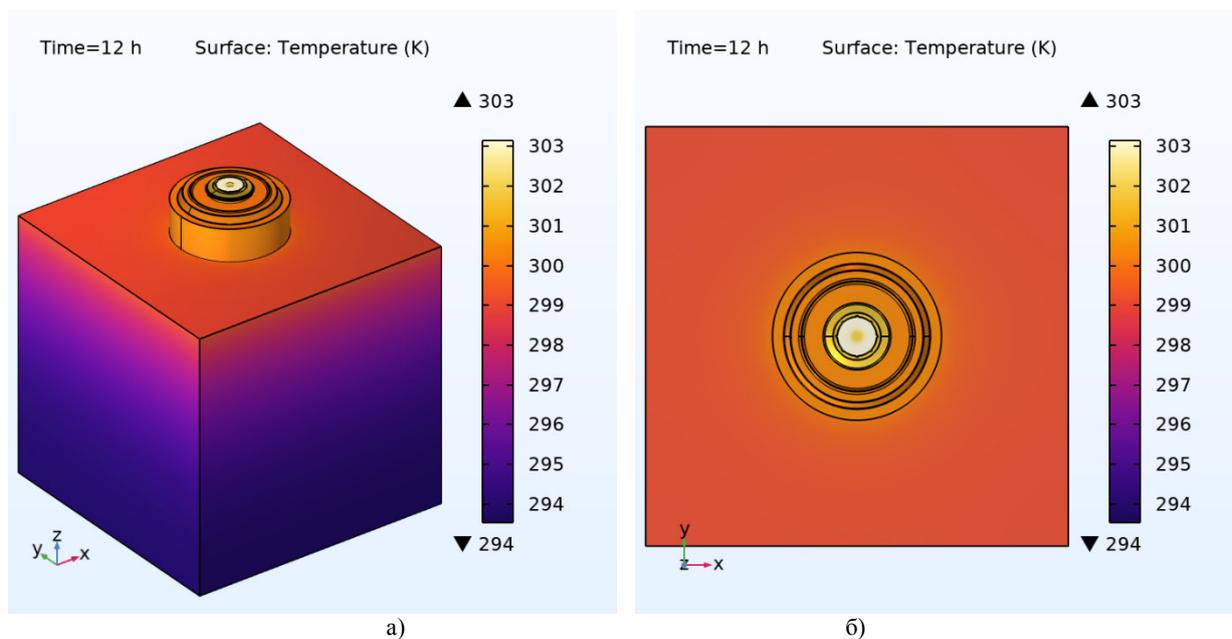


Рис. 2. Изометрическая (а) и планарная (б) проекции поверхностных тепловых полей цифрового двойника мины ТМ-65

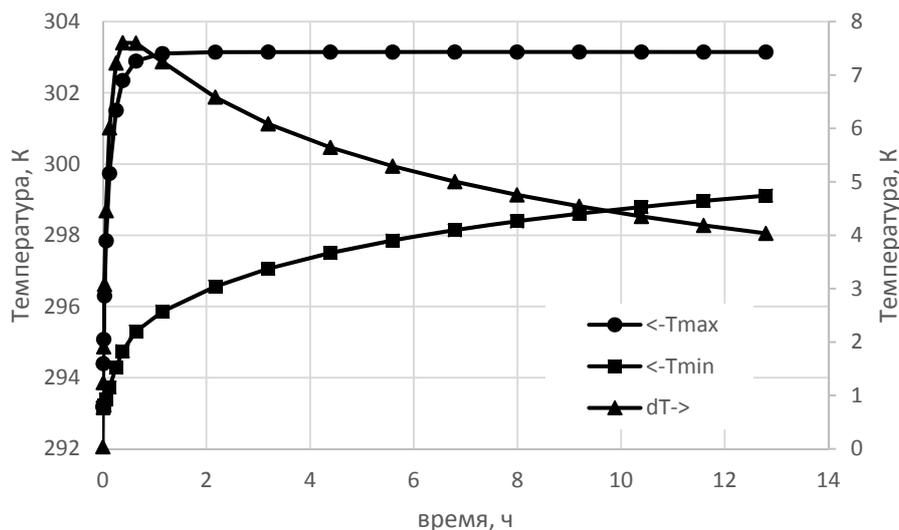


Рис. 3. Динамика температурного контраста

Выводы

Предлагаемый подход к синтезу тепловых портретов наземных объектов в неравновесном термодинамическом состоянии на основе математических моделей, сочетающих 3D-геометрическое представление и математическое описание процессов теплопередачи в пористой среде, даёт возможность: 1) моделировать изменяющиеся во времени поверхностные температурные распределения с учётом степени пористости материала, соотношения жидкой и газообразной фаз поровой среды, условий теплообмена с внешней средой, теплофизических характеристик твёрдой матрицы и фаз поровой среды; 2) анализировать динамику формирования температурных полей, величину температурного контраста на поверхности, возможность детектирования подповерхностных объектов тепловизионными методами. Такой подход позволяет оценивать перспективность применения тепловизионной диагностики для конкретных объектов и условий.

Ввиду высоких трудоёмкости и стоимости изготовления макетов наземных объектов, а также проведения натурных контрольных измерений предлагаемый подход позволит существенно сократить стоимость и время создания

уникальных тепловых сигнатур определенных типов наземных объектов для обучения систем технического зрения и повышения вероятности распознавания. Разработанный алгоритм позволит решать ряд практических задач, включая: определение оптимального периода для тепловизионного обследования (момент наивысшего температурного контраста) с учётом характеристик пористого материала, исследуемого объекта и внешних условий; анализ предельной глубины залегания объекта, при которой ещё возможно точное определение его параметров; оценка типов объектов, подходящих для диагностики с помощью тепловизионных методов; изучение воздействия структуры и свойств пористой среды, а также внешних факторов, на точность и надёжность тепловизионных измерений.

Литература

1. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: Historical development, current status and perspectives / B. Caoa [et al.] // *Remote Sensing of Environment*, 232, 2019, 111304.
2. Thermal infrared identification of buried landmines / T.T. Nguyen [et al.] // In R.S. Harmon, J.T. Broach, J.H. Holloway, Jr. (Eds.), *SPIE Proceedings*. 2005. Vol. 5794. p. 198. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.626263>.
3. Bertrand H., Heberlein D., Frasier J. Report of UXO Technology Subgroup: Overview and Technology Assessment // Institute for Defense Analyses, IDA Document D-3007, Log: H 04-001205, p. 56.
4. Bello R. Literature review on landmines and detection methods // *Front. Sci.* 2013. Vol. 3. pp. 27-42.
5. Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines / J. Baur [et al.] // *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(5), 859. DOI: 10.3390/rs12050859.
6. Deans J., Gerhard J., Carter L.J. Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface // *Infrared Physics & Technology*. 2006. Vol. 48. Issue 3. pp. 202-216.
7. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, А.Г. Дивин, Ю.И. Головин. М.: Техносфера, 2019. 213 с.
8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
9. Almond D.P., Peng W. Thermal imaging of composites // *J. Microsc.* 2001. Vol. 201. pp. 163-170.
10. Gross, S.; Reusken, A. *Numerical Methods for Two-phase Incompressible Flows*, 2011, Springer. Crossref, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19686-7>.
11. Еремеев Ю.Г. Противотанковая мина ТМ-46 // *Оружие и боеприпасы: сайт*. 2026. https://weaponland.ru/publ/protivotankovaja_mina_tm_46/20-1-0-578 (дата обращения: 18.01.2026).
12. Sowa M., Tuřańska D. Comparison of time-stepping methods for transient magnetic field computations // *Comsol Multiphysics Electrical Engineering*. 2014. № 77. pp. 141-147.
13. Chung G. Hulbert A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized-method J. *Appl. Mech.*, 60 (2), 1993, pp. 371-375.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., стер., испр., перепеч. со 2-го изд. 1972. 720 с.
15. De Jong W., Lensen H.A., Janssen Y.H.L. Sophisticated test facility to detect land mines // *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV* (Orlando: SPIE). 1999. pp. 1409-1418.
16. Simunek J., Hendrickx J.M.H., Borchers B. Modeling transient temperature distributions around landmines in homogenous bare soils // *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI* (Orlando: SPIE). 2001. pp. 387-397.
17. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 10-е изд. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.

Поступила 29.09.2025; принята к публикации 26.02.2026

Информация об авторах

Ряжских Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2834-3000

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, проректор по взаимодействию с промышленными предприятиями, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: 0000-0001-5779-4727

Хвостов Виталий Анатольевич – студент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: vitkhv2007@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3169-3925

Соболева Елена Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sobol5661@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5860-9615

Identification of thermal signatures of objects on the free surface of porous bodies

V.I. Ryazhskikh¹, I.G. Drozdov¹, V.A. Khvostov², E.A. Soboleva¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract. The paper proposes a method for identifying the thermal signatures of ground-based objects for their detection and classification by thermal imaging systems on the free surface of a porous medium. The method includes a geometric 3D image of the object and the surface layer of the porous medium on which it is located, as well as a mathematical model that describes the non-stationary conjugate temperature fields in the porous medium and the object, taking into account the porosity, volume fractions of the liquid and gaseous phases of the fluid, the heat transfer conditions, and the thermophysical properties of the solid framework and the fluid phases. The models are coupled with the environmental model through the boundary conditions of the energy conservation equations, allowing one to simulate changes in ambient air temperature and the intensity of heat transfer from the surface of an object and a porous medium. Computational experiments have shown the adequacy of the description of the patterns of heat transfer in the given formulation of the problem and confirmed the existence of a maximum in the function of the temperature contrast with respect to time. The proposed approach can be applied to solve various problems: recognition of dangerous objects, assessment of the possibility of their detection by the thermal imaging method, search for optimal time intervals with maximum sensitivity to the detection of objects of a certain class.

Key words: thermal imaging control; mathematical modeling; heat transfer

References

1. Caoa B. et al. "A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: Historical development, current status and perspectives", *Remote Sensing of Environment*, 2019, no. 232, art. 111304.
2. Nguyen, T. T., Hao, D. N., Lopez, P., Cremer, F., & Sahli, H. (2005). Thermal infrared identification of buried landmines. In R. S. Harmon, J. T. Broach, & J. H. Holloway, Jr. (Eds.), *SPIE Proceedings* (Vol. 5794, p. 198). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.626263>.
3. Bertrand H., Heberlein D., Frasier J. "Report of UXO Technology Subgroup: Overview and Technology Assessment", Institute for Defense Analyses, *IDA Document D-3007, Log: H 04-001205*, 2004, 56 p.
4. Bello R. "Literature review on landmines and detection methods", *Front. Sci.*, 2013, no. 3, pp. 27–42.
5. Baur J. et al. "Deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines", *Remote Sensing*, 2020, vol. 12(5), pp. 859
6. Deans J., Gerhard J., Carter L.J. "Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface", *Infrared Physics & Technology*, 2006, vol. 48, issue 3, pp. 202–216.
7. Golovin D.Yu., Tyurin A.I., Samodurov A.A., Divin A.G., Golovin Yu.I. "Dynamic thermographic methods of non-destructive express control" ("Dinamicheskie termograficheskie metody nezrushayushchego ekspress-kontrolya"), Moscow: Tekhnosfera, 2019, 213 p.
8. Vavilov V.P. "Infrared thermography and thermal control" ("Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol"), Moscow: Spektr, 2009, 544 p.
9. Almond D.P., Peng W. "Thermal imaging of composites", *J. Microsc.*, 2001, vol. 201, pp. 163–170.
10. Gross, S.; Reusken, A. *Numerical Methods for Two-phase Incompressible Flows*, 2011, Springer. Crossref, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19686-7>.
11. Ereemeev, Yu. G. Protivotankovaya mina TM-46 / Yu. G. Ereemeev // *Oruzhie i boepripasy* /: sajt. – 2026. – https://weaponland.ru/publ/protivotankovaya_mina_tm_46/20-1-0-578 (data obrashcheniya: 18.01.2026).
12. Sowa M., Typańska D. "Comparison of time-stepping methods for transient magnetic field computations", *Comsol Multiphysics Electrical Engineering*, 2014, no. 77, pp. 141-147.
13. Chung G.H. "A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized-method", *J. Appl. Mech.*, 1993, no. 60 (2), pp. 371-375.
14. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svojm-stvam gazov i zhidkostej*. 2-e izd., ster., ispr., Perepech. so 2-go izd. 1972. 720 p.
15. De Jong W., Lensen H.A., Janssen Y.H.L. "Sophisticated test facility to detect land mines", *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV*, Orlando: SPIE, 1999, pp. 1409-1418.
16. Simunek J., Hendrickx J.M.H., Borchers B. "Modeling transient temperature distributions around landmines in homogeneous bare soils", *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI*, Orlando: SPIE, 2001, pp. 387-397.
17. Kasatkin A.G. "Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology" ("Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii"), textbook, Moscow: Al'yans, 2004, 753 p.

Submitted 29.09.2025; revised 26.02.2026

Information about the authors

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sci. (Technical), Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskikh_vi@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2834-3000

Igor' G. Drozdov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Vice-Rector for Industrial Relations, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: 0000-0001-5779-4727

Vitaliy A. Khvostov, student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: vitkhv2007@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3169-3925

Elena A. Soboleva, Cand.Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sobol5661@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5860-9615

Методы и алгоритмы машинного обучения в задаче оценки уровня артериального давления

Э.А. Чельшев, М.В. Раскатова

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается задача бесконтактной оценки уровня артериального давления человека по видеоданным съёмки лица с использованием методов и алгоритмов машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена высокой распространённостью артериальной гипертензии и ограничениями традиционных контактных методов измерения давления. Предложен метод, основанный на анализе видеозаписи лица для оценки уровня артериального давления. Видеозаписи подвергаются предварительной подготовке: из них выделяются пространственные области интереса, соответствующие лбу и щекам, по которым формируются временные сигналы цветовых компонент. Сигналы подвергаются полосно-пропускающей частотной фильтрации и непрерывному вейвлет-преобразованию с использованием вейвлета Морле. Для восстановления значений систолического и диастолического артериального давления разработана нейронная сеть на основе архитектуры ResNet18, адаптированная для работы с получаемым признаковым пространством и решающая задачу восстановления регрессии. Обучение и оценка нейронной сети проведена на наборе данных, включающем видеозаписи 2200 испытуемых. Полученные результаты показывают, что предложенный подход обеспечивает точность, сопоставимую с результатами аналогичных исследований, хотя пока не достигает требований, предъявляемых к клиническим измерительным системам. Однако продолжение исследований в данной области представляется перспективным.

Ключевые слова: оценка артериального давления; фотоплетизмография; машинное обучение; глубокое обучение; искусственная нейронная сеть; вейвлет; частотно-временной анализ; метрика

Благодарности. Авторы благодарны ООО «Цифровая медицина» за предоставленные данные и вычислительные мощности.

Введение

Артериальное давление является важным физиологическим показателем. Гипертония (или гипертензия), то есть повышенное артериальное давление, является социально значимым заболеванием. Из информации, предоставляемой Всемирной организацией здравоохранения, известно, что гипертония — одна из основных причин преждевременной смерти. Согласно той же статистике, гипертония наблюдается примерно у 40 % взрослых [1]. Эти факты подчеркивают важность медицинских и технических исследований в данной теме.

Артериальное давление человека характеризуется двумя показателями: систолическим (верхним) и диастолическим (нижним) давлением. Систолическое давление — это максимальное давление в артериях в момент сокращения сердца. Оно дает информацию о работе сердца и состоянии крупных артерий. В то же время диастолическое давление — это минимальное давление в артериях во время расслабления сердца. Диастолическое давление характеризует сопротивление периферических сосудов [2].

Традиционные методы измерения артериального давления основаны на использовании специализированных устройств, которые должны находиться в прямом контакте с телом человека во время измерения. Например, широко известен манжеточный метод с использованием тонометра: манжета надевается на руку, давление в нее нагнетается вручную или автоматически, затем выполняются измерения. Однако очевидно, что этот метод неудобен, так как имеет ограничения в применении и требует наличия тонометра [3].

Носимые электронные устройства, которые можно использовать для измерения артериального давления, гораздо удобнее для повседневного применения. Особенно широкое распространение среди них получили безманжетные устройства (например, умные часы, фитнес-трекеры и т. п. устройства). Такие устройства анализируют пульсовую волну, порождаемую кровотоком. Самым распространенным методом оценки артериального давления в носимых устройствах является метод, основанный на измерении времени прохождения пульсовой волны: устройство производит замер между моментом удара сердца и моментом прихода пульсовой волны к устройству. Затем с

использованием специального алгоритма производится вычисление артериального давления. Другим популярным методом является анализ формы пульсовой волны. В основе данного метода лежит фотоплетизмография (ФПГ). Фотоплетизмография основана на использовании инфракрасного излучения и применяется в различных медицинских задачах. Любое устройство, использующее ФПГ, содержит инфракрасный излучатель и датчик, принимающий свет, отраженный тканями человека. По изменению отраженного света можно получить информацию об изменениях кровотока, форме и амплитуде пульсовой волны. Затем применяются алгоритмы цифровой обработки сигналов и машинного обучения для оценки уровня артериального давления [4].

В последние годы количество работ в области информационных технологий по рассматриваемой теме неуклонно растет. В частности, активно исследуются бесконтактные методы оценки уровня артериального давления [5, 6]. Примером бесконтактного метода является дистанционная фотоплетизмография, которая может стать очень популярной благодаря широкому распространению цифровых камер (в частности, в мобильных устройствах). Дистанционная фотоплетизмография предполагает запись видео поверхности кожи человека и дальнейший анализ с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов и машинного обучения. С помощью дистанционной фотоплетизмографии можно получить комплексное представление о кровотоке и процессах, происходящих в сосудах на определенном участке поверхности кожи. Еще одним преимуществом дистанционной фотоплетизмографии является возможность осуществления с ее помощью непрерывного мониторинга состояния организма [7].

В статье предлагается метод бесконтактной оценки уровня артериального давления по видеоданным съемки лица испытуемого с использованием алгоритмов цифровой обработки сигналов и машинного обучения. Предложенный метод комбинирует частотную фильтрацию, непрерывное вейвлет-преобразование и искусственную нейронную сеть.

Обзор литературы

Количество работ, посвященных бесконтактному определению уровня артериального давления, неуклонно растет в последние годы. В данном обзоре рассмотрены лишь некоторые работы по данной тематике, показавшиеся ав-

торам наиболее релевантными в контексте данного исследования.

Задача оценки уровня артериального давления (или его изменения) может решаться с использованием двух подходов, соответствующих двум различным задачам анализа данных: классификации и восстановления регрессии. Классификационный подход рассматривается в работах [8-10]. В качестве недостатка такого подхода можно отметить тот факт, что классификация не дает численных значений систолического и диастолического давления или его изменений. Также необходимо отметить, что значения полноты для лучших классификаторов в [8] составляют менее 70 %. Можно сделать вывод, что вероятность ложноположительных прогнозов в рассматриваемом решении достаточно высока.

Авторами выявлено множество работ, посвященных оценке уровня артериального давления с использованием данных фотоплетизмографии. Так, например, сигнал фотоплетизмографии используется в работах [8] и [9] для классификации уровня давления и обнаружения изменений артериального давления в реальном времени соответственно.

В ряде работ помимо данных фотоплетизмографии использовались так же данные другой диагностической процедуры: электрокардиографии [10, 11]. В работе [11] удалось достичь следующих метрик (мм рт. ст.):

- Систолическое давление: RMSE = 5.42;
- Диастолическое давление: RMSE = 7.81.

И, хотя полученные в рассматриваемой работе ошибки оценки уровня артериального давления можно считать низкими (по международным требованиям, использовать в клинической практике допускается приборы с погрешностью измерения менее 5 мм. рт. ст.), стоит отметить, что предлагаемые в данных работах методы оценки требуют специального оборудования и не являются бесконтактными.

В статье [12] авторы предлагают искусственную нейронную сеть для оценки артериального давления на основе данных дистанционной фотоплетизмографии, а именно видеозаписей человеческого лица. Задача была сформулирована как задача восстановления регрессии.

Генерация признаков включала следующие этапы: обнаружение области интереса, аугментация данных, реконструкция и сегментирование. Были получены срезы пространственно-временных карт признаков. Для улучшения качества видео использовалось модифицированное цветовое пространство YUV.

Для решения задачи определения уровня давления в данной работе предлагается искусственная нейронная сеть, включающая в себя сверточную нейронную сеть архитектуры ResNet и LSTM-сеть (англ. Long Short-Term Memory, рус. долгая краткосрочная память). Финальным элементом предложенной нейронной сети является регрессор, объединяющий предварительные результаты предыдущих слоёв и предназначенный для определения уровня артериального давления.

В данной работе использовались два тестовых набора данных. Наилучшие результаты показала схема с длиной сегмента видеозаписи 150 секунд. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты на тестовых наборах для [13]

Тестовый набор данных	Тип давления	SD, мм рт. ст.	RMSE, мм рт. ст.	MAE, мм рт. ст.
Первый	Систолическое	16.02	16.55	12.35
	Диастолическое	11.98	12.22	9.54
Второй	Систолическое	9.81	9.94	8.07
	Диастолическое	8.28	8.45	6.78

В статье [13] исследуется влияние предварительного вейвлет-преобразования на эффективность классификации артериального давления. Набор данных включает исходные сигналы ФПГ и соответствующие значения артериального давления в качестве категориальных меток.

Сигналы ФПГ были обработаны с использованием скользящего среднего для сглаживания. Затем было выполнено построение признакового пространства с помощью непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) полученного сигнала. Для последующей обработки преобразованного сигнала была разработана сверточная нейронная сеть.

Наилучшие результаты классификации продемонстрировал гауссовский вейвлет при использовании сегментов ФПГ длительностью 2,4 с. Точность, достигнутая с его применением, превзошла соответствующий показатель без предварительного вейвлет-преобразования: так метрика ассигасу без предварительного вейвлет-преобразования достигала лишь 70%, в то время как аналогичная метрика с предварительным гауссовским вейвлет-преобразованием равнялась 91 %.

Стоит отметить, что непрерывное вейвлет-преобразование является более предпочтительным методом предварительной обработки и анализа сигналов физиологической природы, чем преобразование Фурье, так как физиологические сигналы не являются строго периодиче-

скими и зависят от множества регуляторных механизмов организма [7].

Подготовка данных

В данном исследовании разрабатывается и исследуется еще один метод оценки уровня артериального давления по видеоданным. В работе использовался набор данных, содержащий видеозаписи лиц 2200 уникальных испытуемых, снабжённые метками артериального давления, частоты пульса и других медико-биологических параметров. Из каждой видеозаписи извлекались четыре фрагмента видео (два длительностью 30 с и два — 45 с), при этом момент фактического измерения артериального давления соответствовал левой или правой границе фрагмента. В результате было сформировано по 4316 фрагментов для каждой длительности.

Для каждого кадра видефрагмента выполнялось выделение региона интереса (ROI), содержащего изображение лица, с использованием нейросетевого алгоритма детекции лиц YuNet [14]. Далее на ROI определялись ключевые точки лица с помощью нейронной сети, основанной на архитектуре ResNet [15]. Кадры, на которых лицо не удавалось корректно детектировать, исключались из дальнейшей обработки.

Выделенный ROI разделялся на четыре пространственные области (локуса), соответствующие левой и правой частям лба, а также левой и правой щекам. Для каждого локуса и каждого кадра вычислялись средние значения интенсивности трёх цветовых каналов формата RGB. Таким образом, каждый видефрагмент представлялся набором из 12 сигналов.

Полученные сигналы подвергались полосно-пропускающей фильтрации с использованием фильтра Баттерворта 4-го порядка в диапазоне 0.07–2.0 Гц, после чего ресемплировались до частоты 8 Гц для унификации длины временных рядов. Выбор данных значений частот объясняется тем, что кардиальная активность человеческого организма, как правило, имеет частоту не выше 2 Гц. При этом необходимо учитывать переходную область частотного фильтра, а также соблюдать условия теоремы Котельникова.

На заключительном этапе для каждого сигнала вычислялось непрерывное вейвлет-преобразование с использованием материнской вейвлет-функции Морле, формализуемое для дискретного сигнала выражением (1).

$$f_{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \sum_{k=0}^{N-1} f[k] \psi^* \left(\frac{k * \Delta t - \tau}{s} \right) \Delta t \quad (1)$$

где Δt – период дискретизации;

N – длина сигнала (количество отсчетов).

Для полученных комплексных коэффициентов НВП были вычислены их модули. Таким образом, был сформирован набор данных, в котором каждый объект представлен 12 амплитудными скалограммами.

Нейронная сеть

Для непосредственного решения задачи оценки уровня артериального давления на подготовленных данных была разработана искусственная нейронная сеть на основе архитектуры ResNet.

ResNet (англ. Residual Network) — это сверточная нейронная сеть, впервые представленная в 2015 году в работе [15]. Данная нейросетевая архитектура была призвана решить проблему затухания градиента в глубоких нейронных сетях. Кроме того, данная нейросетевая архитектура хорошо зарекомендовала себя в задачах обработки графической информации [16].

В данной работе производилось дообучение (англ. fine tuning) искусственной нейронной сети ResNet18, предобученной на наборе данных ImageNet. На рис. 1 представлена архитектура ResNet18. ResNet18 является одной из самых компактных версий в семействе ResNet и содержит 18 весовых слоев. Выбор данной архитектуры для настоящего исследования обусловлен ее вычислительной эффективностью.

Искусственная нейронная сеть ResNet18 спроектирована для решения задачи классификации. В настоящей же работе решается задача восстановления регрессии. По этой причине была проведена модификация архитектуры ResNet18. Базовая модель ResNet18 принимает на вход трёхканальные изображения (RGB). В рамках данной работы входные данные содержали 12 каналов, что потребовало модификации первого сверточного блока. При этом прочие характеристики слоя сохранялись. Таким образом, архитектура была адаптирована для восприятия расширенного многоканального входа без изменения глубины последующих блоков.

Для решения задачи восстановления регрессии последний слой данной нейронной сети был заменен на регрессионный модуль (голову, англ. head), принимающий на вход компактное представление изображений, формируемое в так называемой «спине» нейронной сети (англ. backbone). Регрессионный модуль производит выравнивание входного тензора в одномерный вектор, затем данный вектор подается на полносвязный слой 128 нейронов с последующей функцией активации ReLU. Выход данного слоя подается на слой отсева Dropout. Выходной слой имеет два выходных нейрона, соответствующих двум предсказываемым величинам.

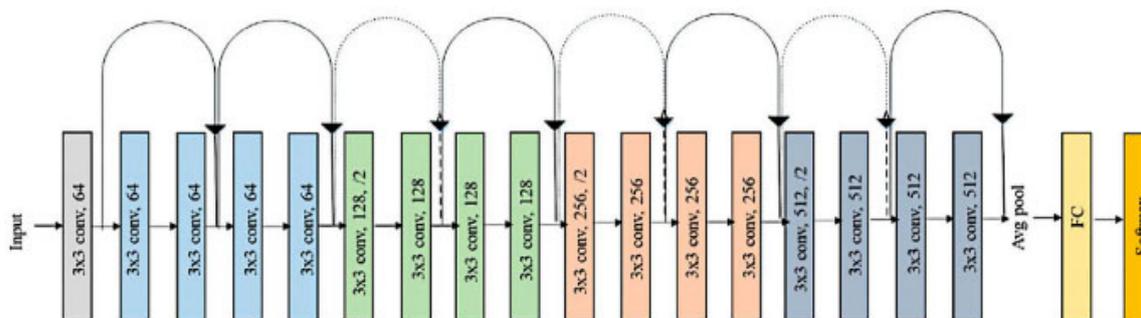


Рис. 1. Архитектура ResNet18

Обучение и результаты

Обучение разработанной нейронной сети выполнялось с использованием библиотеки Ortpna языка программирования Python, применяющей стохастический байесовский поиск по пространству гиперпараметров с механизмом прерывания неэффективных сеансов обучения (англ. pruning).

В процессе оптимизации варьировался целый ряд гиперпараметров модели и процесса обучения: скорость обучения (англ. learning rate), коэффициент L2-регуляризации (англ.

weight decay), вероятность отсева (англ. dropout), размер батча, оптимизатор и стратегия изменения скорости обучения, функция потерь. В процессе обучения вычислялись следующие показатели качества:

- функция потерь (англ. Loss) на обучающей, валидационной и тестовой выборках;
- интегральные значения метрик: средней абсолютной ошибки (англ. MAE) и корня из среднеквадратичной ошибки (англ. RMSE) для обоих выходных параметров (систолического и диастолического давления) совместно;

- значения метрик для систолического и диастолического давления отдельно.

В табл. 2 представлены значения метрик, достигнутые на тестовой выборке

Таблица 2

Значения метрик, достигнутые на тестовой выборке

Длительность фрагмента, сек	MAE, сист. давл.	MAE, диаст. давл.	RMSE, сист. давл.	RMSE, диаст. давл.
30	13,62	8,75	17,54	11,05
45	13,83	8,84	17,87	11,55

Заключение

Полученные результаты демонстрируют, что точность полученного в настоящей работе решения сопоставима с точностью, показанной в аналогичных работах, хотя и не позволяет использовать данный метод в клинической практике.

Предложенный метод комбинирует частотную фильтрацию, непрерывное вейвлет-преобразование и алгоритмы машинного обучения. При этом за счет используемого подхода удается существенно сократить объем данных относительно исходных величин с сохранением частотно-временной информации.

В дальнейших работах авторы планируют увеличить точность инструментов оценки уровня артериального давления по видеозаписи лица человека, особенно в области высокого и низкого артериального давления. Кроме того, необходима оценка способности разработанного метода эффективно работать в различных условиях (различная освещенность, нестабильность изображения, наличие посторонних объектов и т. д.).

В целом, можно отметить, что общие тенденции развития инструментов и методов оценки артериального давления направлены на повышение доступности таких решений и обеспечение возможности их использования в различных условиях.

Литература

1. World Health Organization (WHO). Hypertension. URL: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/hypertension> (дата обращения: 27.08.2025).
2. Desai A.N. High blood pressure // JAMA. 2020. Vol. 324. № 12. P. 1254-1255.

3. History and evolution of blood pressure measurement / S.A. Noh [et al.] // Clinical Hypertension. 2024. Vol. 30. № 1. P. 9. DOI: 10.1186/s40885-024-00268-7

4. Blood pressure measurement: from cuff-based to contactless monitoring / P.-K. Man [et al.] // Healthcare. 2022. Vol. 10. P. 2113. DOI: 10.3390/healthcare10102113

5. Cuffless blood pressure measuring devices: review and statement by the European Society of Hypertension Working Group on Blood Pressure Monitoring and Cardiovascular Variability / G.S. Stergiou [et al.] // Journal of Hypertension. 2022. Vol. 40, № 8. P. 1449-1460. DOI: 10.1097/HJH.0000000000003224.

6. Non-contact vision-based techniques of vital sign monitoring: systematic review / L. Saikevičius, V. Raudonis, G. Dervinis, V. Baranauskas // Sensors. 2024. Vol. 24. P. 3963. DOI: 10.3390/s24123963

7. Telemonitoring of capillary blood flow in the human skin: new opportunities and prospects / A.A. Fedorovich [et al.] // Clinical Practice. 2018. Vol. 15. № 2. P. 561-567.

8. Deep learning classification of photoplethysmogram signal for hypertension levels / N. Nasir [et al.] // arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.14556> (дата обращения: 27.08.2025).

9. Using photoplethysmography to detect real-time blood pressure changes with a calibration-free deep learning model / J. Hong, M. Nandi, W. Jin, J. Alastruey // arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.03274> (дата обращения: 27.08.2025).

10. Continuous blood pressure estimation based on multi-scale feature extraction by the neural network with multi-task learning / H. Jiang, L. Zou, D. Huang, Q. Feng // Frontiers in Neuroscience. 2022. Vol. 16. P. 883693. DOI: 10.3389/fnins.2022.883693.

11. A novel convolutional neural network for continuous blood pressure estimation / S. Rastegar, H. Gholamhosseini, A. Lowe, M. Lindén // 8th European Medical and Biological Engineering Conference. IFMBE Proceedings. Cham: Springer, 2021. P. 22-28. DOI: 10.1007/978-3-030-64610-3_3

12. Remote blood pressure estimation via the spatio-temporal mapping of facial videos / Y. Chen, J. Zhuang, B. Li, Y. Zhang, X. Zheng // Sensors. 2023. Vol. 23. P. 2963. DOI: 10.3390/s23062963.

13. Improving the accuracy in classification of blood pressure from photoplethysmography using continuous wavelet transform and deep learning / J. Wu [et al.] // International Journal of Hypertension. 2021. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2021/9938584>.

14. Wu W., Peng H., Yu S. YuNet: A Tiny Millisecond-level Face Detector // Machine Intelligence Research. 2023. Vol. 20. P. 656-665. DOI: 10.1007/s11633-023-1423-y

15. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA, 2016. P. 770-778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90

16. Hochreiter S. The Vanishing Gradient Problem During Learning Recurrent Neural Nets and Problem Solutions // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 1998. Vol. 6. P. 107-116. DOI: 10.1142/S0218488598000094

Поступила 11.09.2025; принята к публикации 19.02.2026

Информация об авторах

Челышев Эдуард Артурович – аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1), e-mail: chel.ed@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8417-8823

Раскатова Марина Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лefortovo, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.), e-mail: marina@raskatova.ru, ORCID: 0000-0001-7671-3312

Machine learning methods and algorithms in the task of blood pressure estimation

E.A. Chelyshev, M.V. Raskatova

National Research University «MPEI», Moscow, Russia

Abstract. The paper considers the problem of non-contact blood pressure estimation based on video data from facial video using machine learning methods and algorithms. The relevance of the study is due to the high prevalence of hypertension and the limitations of traditional contact blood pressure measurement methods. A method based on the analysis of facial video recordings for blood pressure estimation is proposed. Video recordings were prepared: spatial regions of interest corresponding to the forehead and cheeks were selected from them, along which time signals of color components were formed. The signals were subjected to band-pass frequency filtering and continuous wavelet transform using the Morlet wavelet. To restore the values of systolic and diastolic blood pressure, a neural network based on the ResNet18 architecture has been developed, adapted to work with the resulting feature space and solving the problem of regression restoration. The neural network was trained and evaluated on a dataset including video recordings of 2,200 subjects. The results show that the proposed approach provides accuracy comparable to the results of similar studies, but it does not yet meet the requirements for clinical measurement systems. However, continued research in this area seems promising.

Key words: blood pressure estimation; photoplethysmography; machine learning; deep learning; artificial neural network; wavelet; time-frequency analysis; metric

Acknowledgments. The authors are grateful to Digital Medicine LLC for the data and computing power provided.

References

1. “World Health Organization (WHO) Hypertension”, available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hypertension> (date of access: 27.08.2025).
2. Desai A.N. “High blood pressure”, *JAMA*, 2020, vol. 324, no. 12, pp. 1254–1255.
3. Noh S.A. et al. “History and evolution of blood pressure measurement”, *Clinical Hypertension*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 9.
4. Man P.-K. et al. “Blood pressure measurement: from cuff-based to contactless monitoring”, *Healthcare*, 2022, vol. 10, pp. 2113.
5. Stergiou G.S. et al. “Cuffless blood pressure measuring devices: review and statement by the European Society of Hypertension Working Group on Blood Pressure Monitoring and Cardiovascular Variability”, *Journal of Hypertension*, 2022, vol. 40, no. 8, pp. 1449–1460.
6. Saikevičius L. et al. “Non-contact vision-based techniques of vital sign monitoring: systematic review”, *Sensors*, 2024, vol. 24, pp. 3963.
7. Fedorovich A.A. et al. “Telemonitoring of capillary blood flow in the human skin: new opportunities and prospects”, *Clinical Practice*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 561–567.
8. Nasir N. et al. “Deep learning classification of photoplethysmogram signal for hypertension levels”, *arXiv*, available at: <https://arxiv.org/abs/2405.14556> (date of access: 27.08.2025).
9. Hong J., Nandi M., Jin W., Alastruey J. “Using photoplethysmography to detect real-time blood pressure changes with a calibration-free deep learning model”, *arXiv*, available at: <https://arxiv.org/abs/2407.03274> (date of access: 27.08.2025).
10. Jiang H., Zou L., Huang D., Feng Q. “Continuous blood pressure estimation based on multi-scale feature extraction by the neural network with multi-task learning”, *Frontiers in Neuroscience*, 2022, vol. 16, pp. 883693.
11. Rastegar S., Gholamhosseini H., Lowe A., Lindén M. “A novel convolutional neural network for continuous blood pressure estimation”, *Proc. of the 8th European Medical and Biological Engineering Conference. IFMBE*, Cham, Springer, 2021, pp. 22–28.
12. Chen Y., Zhuang J., Li B., Zhang Y., Zheng X. “Remote blood pressure estimation via the spatiotemporal mapping of facial videos”, *Sensors*, 2023, vol. 23, pp. 2963.
13. Wu J. et al. “Improving the accuracy in classification of blood pressure from photoplethysmography using continuous wavelet transform and deep learning”, *International Journal of Hypertension*, 2021, available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2021/9938584> (date of access: 27.08.2025).
14. Wu W., Peng H., Yu S. “YuNet: a tiny millisecond-level face detector”, *Machine Intelligence Research*, 2023, vol. 20, pp. 656–665.
15. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. “Deep residual learning for image recognition”, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 770–778.
16. Hochreiter S. “The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 1998, vol. 6, pp. 107–116.

Submitted 11.09.2025; revised 19.02.2026

Information about the authors

Eduard A. Chelyshev, postgraduate student, National Research University «MPEI» (14, building 1 Krasnokazarmennaya str., ext. ter., municipal district of Lefortovo, Moscow 111250, Russia), e-mail: chel.ed@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8417-8823

Marina V. Raskatova, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, National Research University «MPEI» (14, building 1 Krasnokazarmennaya str., ext. ter., municipal district of Lefortovo, Moscow 111250, Russia), e-mail: marina@raskatova.ru, ORCID: 0000-0001-7671-3312

Увеличение точности детектирования и классификации объектов с использованием карт глубины и нейронных сетей глубокого обучения

А.И. Паршин, В.Ф. Барабанов, М.А. Белых

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Современные алгоритмы, основанные на сетях глубокого обучения, показывают высокие результаты в задачах детектирования и классификации изображений. Тем не менее, есть несколько путей увеличения качества работы алгоритмов, одним из которых является использование карт глубины. Карты глубины помогают точнее отделить объект от фона, более точно определить его форму. Несмотря на большие вычислительные затраты, использование карт глубины может быть полезно в некоторых задачах детектирования и классификации объектов на изображениях. Рассматривается использование карт глубины и нейронных сетей глубокого обучения для увеличения точности детектирования (определения) и классификации объектов на изображениях. В частности, применяется модифицированный алгоритм Detection Transformer (DETR), основанный на использовании сверточных нейронных сетей для получения первичных признаков, и архитектуры трансформера для поиска влияния разных частей изображения друг на друга. Также приводятся зависимость ошибки обучения от количества эпох для обучающей выборки набора данных препятствий и дефектов на дорожном покрытии и показатели точности для различных наборов данных как с использованием дополнительной сети анализа карт глубины, так и без нее.

Ключевые слова: распознавание объектов; анализ изображений; карты глубины; Detection Transformer (DETR); сверточная нейронная сеть

Введение

В последнее время для детектирования и классификации объектов на изображении используются различные алгоритмы на основе сверточных сетей глубокого обучения и специальных механизмов увеличения точности, например, использование архитектуры трансформера для выделения и учета взаимного влияния различных областей изображения на конечный результат. К таким алгоритмам относятся EfficientDet, DETR и модификации, семейство You Only Look Once (YOLO).

Еще одной возможностью увеличения точности детектирования и классификации объектов является использование карт глубины. Карта глубины – это изображение, каждый пиксель которого характеризует расстояние от точки съемки, до точки поверхности объектов сцены. На рис. 1 показан пример исходного изображения и, соответствующей ему, карты глубины.

Как видно из примера, чем ближе от снимающей камеры находится точка на изображении, тем более темным будет ее цвет.



Рис. 1. Пример исходного изображения и карты глубины

На примере так же хорошо показано, что контуры некоторых объектов, в данном случае – контуры дорожного знака, на картах глубины лучше различимы, чем на исходном изображении, что должно увеличить точность определения границ объекта в задаче детектирования и классификации.

Получение наборов данных и карт глубины

Карты глубины могут быть получены при использовании различных методов, таких как:

- Стереозрение – метод построения карт глубины, полученных посредством анализа изображений с двух камер (стереокамер) [1]. Снимки делаются одновременно обеими каме-

рами, далее при помощи специальных алгоритмов ищется соответствие между объектами на левом и правом изображении. На основании разности в положении объектов на изображении строится карта глубины. Принцип работы стереокамер показан на рис. 2.

Для окончательного построения карт глубины используются алгоритмы, основанные на сверточных нейронных сетях с добавлением архитектуры трансформера, такие как AANet (2020) [2] или Attention Concatenation Volume Network (ACVNet, 2022) [3, 4]. К достоинствам стереокамер можно отнести относительно высокое качество и небольшую цену, к недостаткам – увеличенные вычислительные ресурсы, необходимость калибровки камер.

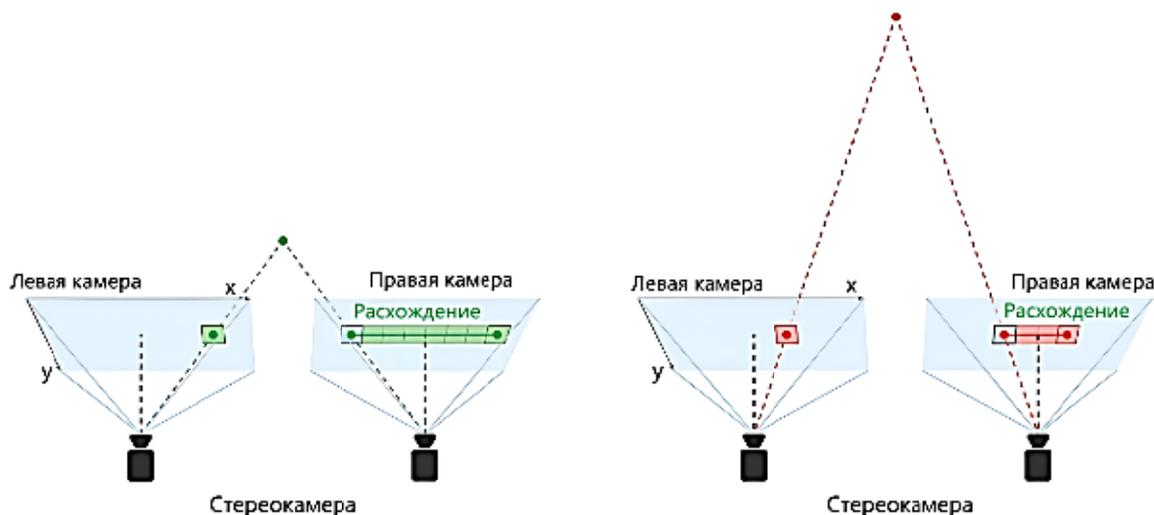


Рис. 2. Принцип работы стереокамер

- Сканирующие лидары – устройства, состоящие из излучателя и принимающего сенсора,двигающихся по определенной траектории. Световые импульсы, отражающиеся от поверхности различных предметов, попадают в приемный сенсор, обрабатываются там, и на разностях фаз между переданными и принятыми импульсами строится карта глубины. Сканирующие лидары обладают высокой точностью, но при этом отличаются крайне высокой ценой (десятки тысяч долларов).

- Модели предсказания глубины – карты глубины строятся на основе только RGB-изображений при помощи специализированных алгоритмов, основанных на архитектуре сверточных нейронных сетей. К современным моделям относятся DenseDepth (2018), Dense Prediction Transformer (DPT, 2021) [5], Global-Local Path Network (GLPN, 2021) [6]. К достоинствам этого метода построения карт глуби-

ны можно отнести простоту, так как не требуется никаких дополнительных устройств. Однако, карты глубины, построенные только с использованием RGB-изображений, обладают меньшей точностью (в лучшем случае 5-10 %) и могут содержать грубые ошибки.

В данной работе применялись карты глубины, полученные с использованием как стереокамер, так и моделей предсказания глубины на основе только RGB-изображений. Было получено два набора данных:

1. Набор данных, состоящий из размеченных изображений дорожных знаков, около 1000 различных изображений.

2. Набор, содержащий различные препятствия и дефекты на дорожном покрытии, требующие повышенного внимания водителя. Набор состоит из примерно 500 размеченных изображений. Пример размеченного изображения представлен на рис. 3.



Рис. 3. Пример размеченного RGB-изображения

Примерно 90 % изображений использовались для обучения, оставшаяся часть – для тестирования.

Модель алгоритма детектирования и классификации объектов

На рис. 4 представлена обобщенная схема получения и анализа данных, использующая как изображения глубины, так и RGB-изображения. Исходное изображение синхронно захватывается с обеих камер, обрабатывается, строится карта глубины. Далее изображения поступают на вход соответствующего модуля обработки, выходы которого используются в суммирующем блоке для окончательного предсказания. Модули нейронной сети строятся на основе модифицированного алгоритма Detection Transformer (DETR) [7].

Алгоритм DETR – современный алгоритм поиска объектов на изображении, основанный на использовании сверточных нейронных сетей для получения первичных признаков, и архитектуры трансформера для поиска влияния разных частей изображения друг на друга. Алгоритмы, основанные на архитектуре DETR, отличаются высокой точностью, но требовательны к вычислительным ресурсам.

В случае использования разных моделей для анализа RGB-изображений и изображений глубины (в данном контексте – моделей с разными выходными параметрами) суммирующий блок должен представлять собой полно-

связный слой [8], на входы которого подаются все выходы обеих моделей. Если модели имеют одинаковые выходные параметры можно использовать обычное попарное суммирование выходных параметров моделей с обучаемыми коэффициентами:

$$Out(rgb + d) = k_{rgb}W(rgb) + k_dW(d), \quad (1)$$

где k_{rgb} – обучаемые коэффициенты влияния RGB-составляющей, k_d – обучаемые коэффициенты влияния карт глубины, $W(rgb)$ – выходные веса модели анализа RGB-изображений, $W(d)$ – выходные веса модели анализа карт глубины. Размерность обучаемых коэффициентов зависит от количества выходов модели и, в случае моделей DETR, равна произведению количества детектируемых классов на возможное количество обнаруживаемых объектов (по умолчанию – 100).

Попарное суммирование осуществляется как для ограничивающих рамок, так и для вероятностей нахождения классов, полученных с каждой модели.

Функция потерь для обобщенной модели должна учитывать как точность предсказаний классов, так и точность определения ограничивающих рамок и имеет вид:

$$Loss = \frac{w_{cls} \sum_{i=0}^n L_{cls} + w_{bbox} \sum_{i=0}^n L_{bbox}}{n}, \quad (2)$$

где n – количество объектов, L_{cls} и L_{bbox} – ошибка классификации и определения ограни-

чивающих рамок для каждого объекта, w_{cls} – коэффициент значимости для ошибок классификации, w_{bbox} – коэффициент значимости для ошибок определения ограничивающих рамок. Коэффициенты значимости подбираются эмпирически и в данном случае равны соот-

ветственно 1 и 7 для ошибок классификации и ошибок определения ограничивающих рамок.

На рис. 5 представлена зависимость ошибки обучения от количества эпох для обучающей выборки набора данных препятствий и дефектов на дорожном покрытии.

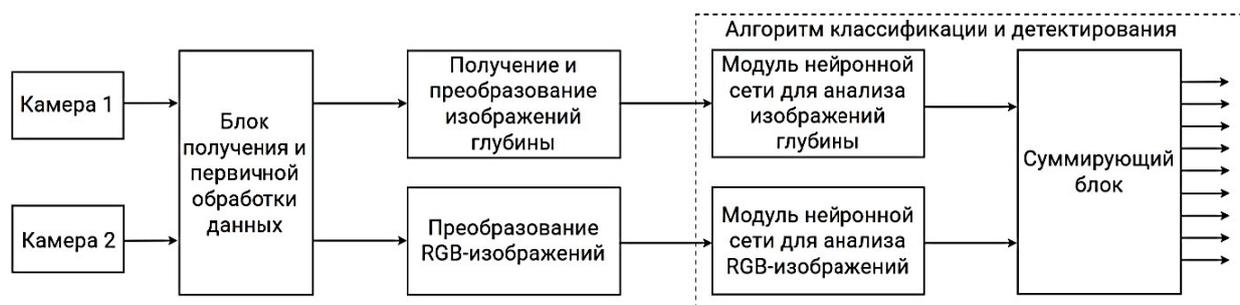


Рис. 4. Обобщенная схема получения и анализа данных

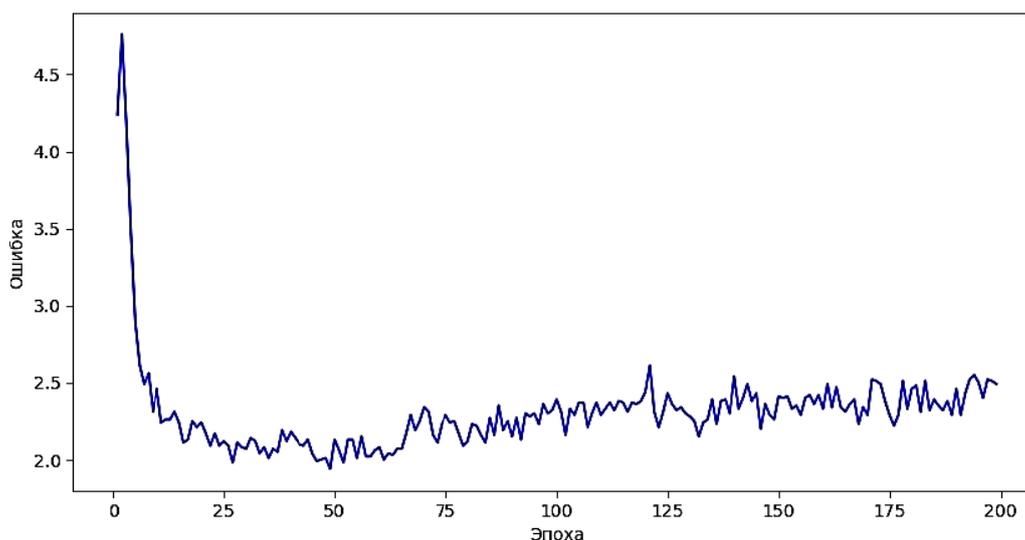


Рис. 5. Зависимость ошибки от количества эпох для тестовой выборки

Таблица 1

Точность на разных наборах данных

Набор данных	Точность без карт глубины, %	Точность с картами глубины
Дорожные знаки	85,1	87,3
Препятствия на дороге и дефекты дорожного покрытия	62,4	62,6

Показатели точности для различных наборов данных представлены в табл. 1. Для сравнения приведены данные как с использованием дополнительной сети анализа карт глубины, так и без нее.

Из таблицы видно, что использование карт глубины положительно влияет на увеличение точности детектирования и классификации дорожных знаков, так как объекты на изображении имеют четкие контуры и их легко отделить от фона.

В этом случае дополнительная сеть анализа карт глубины помогает более точно определить границы и форму объектов, что упрощает детектирование и классификацию.

В случае дефектов дорожного покрытия выделить дефект или препятствие на картах глубины сложнее, и дополнительная сеть слабо влияет на увеличение точности.

Заключение

Разработан алгоритм, использующий изображение глубины для увеличения точности детектирования и классификации объектов на изображении.

Предложена функция потерь для обобщенной модели, учитывающая как точность предсказаний классов, так и точность определения ограничивающих рамок.

Проведены вычислительные эксперименты как с использованием карт глубины, так и без них.

Экспериментально показано, что использование карт глубины может уменьшить количество ошибок и увеличить точность детектирования и классификации объектов. В то же время эксперименты показали, что карты глубины практически не улучшают качество работы сети, если объект трудно отделить от фона или изменения глубины незначительны.

Литература

1. Development of Active Safety Software of Road Freight Transport, Aimed at Improving Inter-City Road Safety, Based on Stereo Vision Technologies and Road Scene Analysis / V.E. Prun [et al.] // Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Research and Development – 2016», Springer, Cham, 2017. P. 209-218.
2. An Attention-Fused Network for Semantic Segmentation of Very-High-Resolution Remote Sensing Imagery / X. Yang [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021. Vol. 177 (12). P. 238-262.
3. Attention Concatenation Volume for Accurate and Efficient Stereo Matching / Gangwei Xu, Junda Cheng, Peng Guo, Xin Yang // CVPR 2022. 10 p. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Xu_Attention_Concatenation_Volume_for_Accurate_and_Efficient_Stereo_Matching_CVPR_2022_paper.pdf (дата обращения: 26.01.2026).
4. Accurate and Efficient Stereo Matching via Attention Concatenation Volume / G. Xu [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024. Vol. 46. Is. 4. P. 2461-2474.
5. HRFormer: High-Resolution Transformer for Dense Prediction / Y. Yuan [et al.] // arXiv preprint, 2021. 15 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.09408> (дата обращения: 27.01.2026).
6. Global-Local Path Networks for Monocular Depth Estimation with Vertical CutDepth / D. Kim [et al.] // Computer Vision and Pattern Recognition, 2022. 11 p. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.07436> (дата обращения: 27.01.2026).
7. Модификация алгоритма DETR для обнаружения объектов в видеопотоке / А.И. Паршин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 20-25.
8. Garbouge H., Rasti P., Rousseau D. Enhancing the tracking of seedling growth using RGB-Depth fusion and deep learning // Sensors, 2021. Vol. 21. No. 24. P. 8425.

Поступила 09.12.2025; принята к публикации 26.02.2026

Информация об авторах

Паршин Александр Иванович – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Барabanов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

Белых Михаил Алексеевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

Increasing the accuracy of object detection and classification using depth maps and deep learning neural networks

A.I. Parshin, V.F. Barabanov, M.A. Belykh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Modern algorithms based on deep learning networks demonstrate excellent performance in image detection and classification tasks. However, there are several ways to improve the performance of these algorithms, one of which is the use of depth maps. Depth maps help to more accurately separate an object from the background and determine its shape. Despite their high computational costs, depth maps can be useful in some object detection and classification tasks. This article discusses the use of depth maps and deep learning neural networks to improve the accuracy of object detection and classification in images. Specifically, a modified Detection Transformer (DETR) algorithm is applied. This algorithm is based on convolutional neural networks to obtain primary features and a transformer architecture to detect the influence of different image parts on each other. The dependence of training error on the number of epochs for a training sample of a dataset of obstacles and road defects is also presented, along with accuracy metrics for various datasets both with and without the use of an additional depth map analysis network.

Key words: object recognition; image analysis; depth maps; DETR; convolutional neural network

References

1. Prun V.E. et al. "Development of active safety software of road freight transport, aimed at improving inter-city road safety, based on stereo vision technologies and road scene analysis", *Proc. of the Sci.-Practical Conf.: "Research and Development – 2016"*, Springer, Cham, 2017, pp. 209-218.
2. Yang X. et al. "An attention-fused network for semantic segmentation of very-high-resolution remote sensing imagery", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, vol. 177 (12), pp. 238-262.
3. Gangwei Xu, Junda Cheng, Peng Guo, Xin Yang "Attention Concatenation Volume for Accurate and Efficient Stereo Matching", *CVPR 2022*, 10 p., available at: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Xu_Attention_Concatenation_Volume_for_Accurate_and_Efficient_Stereo_Matching_CVPR_2022_paper.pdf (date of access: 26.01.2026)
4. Xu G. et al. "Accurate and Efficient Stereo Matching via Attention Concatenation Volume", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, vol. 46, issue 4, pp. 2461-2474.
5. Yuan Y. et al. "HRFormer: High-Resolution Transformer for Dense Prediction", *arXiv preprint*, 2021, 15 p., available at: <https://arxiv.org/pdf/2110.09408> (date of access: 27.01.2026)
6. Kim D. et al. "Global-local path networks for monocular depth estimation with vertical cutdepth", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, 11 p., available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.07436> (date of access: 27.01.2026)
7. Parshin A.I. et al. "Modification of the DETR algorithm for detecting objects in a video stream", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 20–25.
8. Garbouge H., Rasti P., Rousseau D. "Enhancing the tracking of seedling growth using RGB-Depth fusion and deep learning", *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 24, p. 8425.

Submitted 09.12.2025; revised 26.02.2026

Information about the authors

Aleksandr I. Parshin, seeker, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Head of the ABC Department, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Mikhail A. Belykh, Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

Сравнительный анализ программных решений для мониторинга состояния вычислительных ресурсов организаций

Х.М. Жуманиязов

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

Аннотация. Предложена воспроизводимая методика полевых испытаний для сравнительного анализа систем мониторинга вычислительных ресурсов с учётом расширенных критериев современной практики: возможностей AIOps, уровня наблюдаемости, поддержки контейнерных сред и интеграции с DevOps/ITSM. Разработаны унифицированный тестовый стенд и набор экспериментальных сценариев: тесты масштабируемости и нагрузки, реагирования на инциденты, длительной стабильности, а также оценка операционной эффективности и пользовательского опыта. Эксперименты проводились на виртуальных машинах с контролируемым числом узлов (10–50 VM) с использованием синтетической нагрузки и целенаправленной имитации отказов. В качестве объективных метрик применялись: время обнаружения и оповещения, потребление CPU и памяти, пропускная способность сбора метрик, доля ложных срабатываний, деградация производительности при продолжительной нагрузке, время развертывания и настройки, качество интерфейса и интеграций. На основе эмпирических данных выполнен сравнительный анализ популярных локальных и облачных решений; выявлены архитектурные причины различий в латентности и масштабируемости и показаны компромиссы между автономностью локальных систем и удобством облачных платформ с AIOps. Приведены практические рекомендации.

Ключевые слова: мониторинг вычислительных ресурсов; наблюдаемость; AIOps; контейнерные среды; масштабируемость; латентность обнаружения инцидентов; облачные и локальные решения; сравнительный анализ систем мониторинга

Введение

Эффективное использование и надежность вычислительных ресурсов критически важны для бизнес-процессов, что делает мониторинг принципиально важным. Традиционные средства мониторинга отслеживают доступность и производительность ресурсов [1], однако новые технологии и подходы требуют оценки их возможностей по расширенным критериям. Например, искусственный интеллект для ИТ-операций – AIOps, использует алгоритмы машинного обучения для корреляции событий и обнаружения аномалий [2]. Наряду с этим актуальной становится концепция наблюдаемости – Observability, предполагает единый анализ показателей, логов и трассировок, обеспечивая глубокое понимание состояния системы и ускоряя поиск причин проблем [3]. Кроме того, важны интеграция с инструментами автоматизации DevOps и ITSM, безопасность и поддержка современных сред.

Цель работы – разработка методики полевых испытаний и проведение сравнительного анализа существующих систем мониторинга с учетом расширенных критериев. Результаты исследования позволят определить оптимальное решение для различных сценариев – от малого бизнеса до

крупных предприятий, а также выявить перспективы развития систем мониторинга.

Актуальность и значимость исследования

Несмотря на значительное количество обзорных публикаций по мониторингу вычислительных ресурсов, большинство работ ограничивается описанием теоретических характеристик существующих средств или сравнением устаревших систем по базовым показателям – масштабируемости, производительности сети. В то же время сложность современных инфраструктур требует новых критериев, оценки пользовательских аспектов и системного подхода, основанного на опытных испытаниях.

Данное исследование объединяет количественную оценку работы системы мониторинга – латентность и использование ресурсов – с качественной: оценкой интерфейса и интеграций. Проводится системный анализ как классических систем мониторинга, так и современных облачных платформ. Вводится комплекс критериев оценки, включающих функциональность AIOps, обеспечение поддержки наблюдаемости, мониторинг контейнеризированных сред. Для проведения сравнительного анализа предложена унифицированная тестовая среда, позволяющая воспроизводимо измерять ключевые метрики, время реакции на инциденты и потребление вычислительных ресурсов.

Методика исследования

Для объективного сравнительного анализа разработана методика полевых испытаний, сочетающая количественные и качественные оценки. Эксперименты проводились на унифицированном тестовом стенде, где исследуемые системы мониторинга развертывались на виртуальных машинах. Контролируемые узлы (от 10 до 50 виртуальных машин – VM), использовались для генерации нагрузки и симуляции инцидентов. Все системы предварительно конфигурировались в соответствии с официальной документацией для обеспечения корректного обнаружения узлов, сбора метрик.

Эксперимент включал выполнение следующих сценариев с фиксацией соответствующих метрик.

1. Тестирование масштабируемости и нагрузки. Поэтапное добавление контролируемых узлов с одновременной генерацией синтетической нагрузки: загрузка процессора (CPU), потребление памяти, генерация сетевого трафика. Измеряемые метрики: время обнаружения нового узла и сбора с него базовых метрик; пиковое и среднее потребление ресурсов сервером мониторинга; пропускная способность системы – количество успешно собираемых метрик в единицу времени.

2. Тестирование реакции на инциденты. Целенаправленная симуляция отказов и аномалий: резкое увеличение загрузки CPU до 100 %, остановка сервисов, разрыв сетевых соединений, инъекция аномального трафика. Измеряемые метрики: латентность обнаружения – время от момента возникновения инцидента до срабатывания соответствующего триггера в системе мониторинга; латентность уведомления; количество ложных срабатываний.

3. Тестирование стабильности и надежности. Длительное (6-8 часов) функционирование системы мониторинга под постоянной нагрузкой с периодической симуляцией инцидентов. Измеряемые метрики: наличие деградации производительности; время простоя самой системы мониторинга.

4. Оценка операционной эффективности и пользовательского опыта. Выполнение стандартных административных задач. Измеряемые метрики: время развертывания; время настройки; качество интерфейса – оценка удобства выполнения задач, оцениваемое по скорости создания правил оповещений и наглядности визуализации данных.

Критерии сравнительного анализа включали функциональную полноту, надежность,

масштабируемость, операционную эффективность, интеграционный потенциал и пользовательский опыт, стоимость владения. Данный подход позволяет на основе эмпирических данных выявить сильные и слабые стороны, дать комплексную оценку систем мониторинга в условиях, приближенных к реальным.

Обзор программных продуктов

В качестве материалов исследования были выбраны наиболее популярные и востребованные решения, доступные на рынке в последние пять лет. Среди них: Nagios, SolarWinds, Datadog, PRTG и ManageEngine OpManager.

Nagios – система с открытым ядром Nagios Core [4], функционирующая по принципу активного опроса узлов по протоколам ICMP, WMI, SNMP. Её отличает модульная архитектура, требующая ручной интеграции плагинов для сбора метрик [5]. Коммерческая версия Nagios XI предоставляет веб-интерфейс и инструменты аналитики. Преимущество Nagios – гибкость и расширяемость благодаря развитому сообществу [6]. Критическим недостатком является высокая трудоёмкость конфигурации и отсутствие встроенных механизмов для работы в динамических средах, хотя для Nagios XI существуют модули интеграции с Docker и Kubernetes [7].

SolarWinds – коммерческое решение для мониторинга сетевой инфраструктуры. Продукт использует SNMP, NetFlow и WMI для автоматического построения топологии, анализа трафика и контроля конфигураций [8]. Его сильные стороны – развитый графический интерфейс и комплексная отчетность. Ограничения включают высокие требования к ресурсам сервера, стоимость лицензий и зависимость от экосистемы производителя. Заявленные функции AIOps доступны только в старших редакциях продукта [9].

Datadog – облачная платформа класса «Observability», ориентированная на мониторинг гибридных и облачных сред [10]. Архитектура обеспечивает сбор метрик, логов и трассировок. Ключевое преимущество – интеграция технологий машинного обучения для обнаружения аномалий и корреляции событий [11]. Система обеспечивает высокую степень наблюдаемости за счет объединения разнородных данных в едином интерфейсе [12]. Недостатки – зависимость от канала связи, стоимость подписки и необходимость адаптации для мультиоблачных сценариев.

PRTG Network Monitor – коммерческий продукт, характеризующийся простотой развертывания. Механизм автоматического обнаружения устройств и настройки сенсоров минимизирует усилия по внедрению [13]. Модель лицензирования основана на количестве датчиков, что ограничивает масштабируемость с точки зрения бюджета [14]. Функциональность в части AIOps и предиктивной аналитики отсутствует, система ориентирована на решение стандартных задач мониторинга [15].

ManageEngine OpManager – платформа для средних и крупных предприятий, поддерживающая мониторинг сети, серверов и приложений через SNMP, WMI, NetFlow [16]. Отличается наличием готовых шаблонов и развитыми средствами автоматизации реакции на инциденты [17]. Как и SolarWinds NPM, обладает высокими требованиями к аппаратным ресурсам при масштабировании. Функции AIOps развиты слабее, чем в Datadog, с фокусом на метрики, а не на предиктивный анализ [18].

Результаты исследования

В соответствии с разработанной методикой полевых испытаний был проведен комплекс экспериментов, направленных на сравнитель-

ную оценку выбранных систем мониторинга по ряду ключевых параметров. Результаты, полученные на унифицированном тестовом стенде, позволяют объективно оценить эксплуатационные характеристики каждого решения.

1. Оценка латентности обнаружения инцидентов и оповещений. Эксперимент по измерению временных характеристик реакции систем на инциденты выявил существенные различия, обусловленные архитектурными подходами.

Наибольшую эффективность продемонстрировали облачные платформы, в частности Datadog и SolarWinds NPM. Их асинхронные механизмы сбора данных и распределенная архитектура [19] обеспечили минимальную латентность обнаружения, которая не превышала нескольких секунд даже при максимальной нагрузке в 50 узлов. Это объясняется возможностью масштабирования вычислительных ресурсов в облачной среде и оптимизированными протоколами передачи метрик [20]. На рис. 1 показана зависимость времени обнаружения инцидента от количества контролируемых узлов, которая носит нелинейный характер для систем, основанных на активном опросе, вследствие ограниченности ресурсов центрального сервера мониторинга.

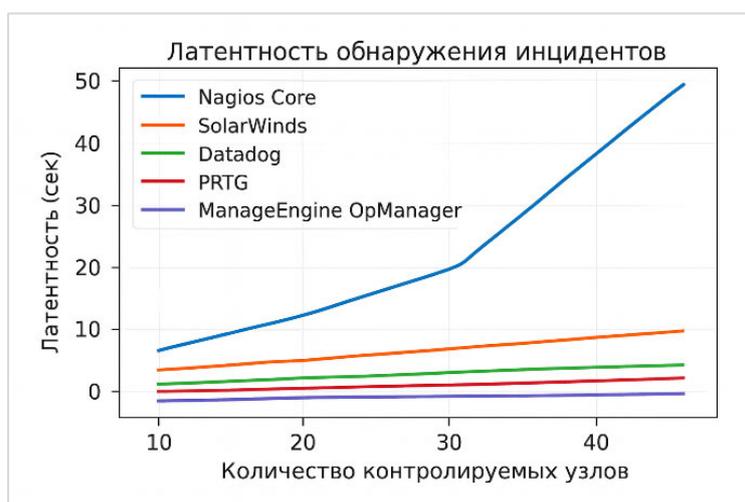


Рис. 1. График зависимости времени обнаружения инцидента от количества контролируемых узлов

Традиционные системы с синхронным опросом показали ожидаемо более высокие задержки. Nagios Core, архитектура которого основана на периодическом выполнении плагинов [21], продемонстрировал экспоненциальный рост времени отклика с увеличением числа узлов, достигнув 55-60 секунд при 50 VM. PRTG Network Monitor и ManageEngine OpManager заняли промежуточное положение с

латентностью 15-20 и 20-25 секунд соответственно, что связано с применением оптимизированных методов опроса, например, с использованием NetFlow в OpManager.

Анализ качества оповещений выявил следующее: система Datadog, за счет применения алгоритмов для фильтрации шума, минимизировала количество ложных срабатываний. SolarWinds обеспечил стабильное и детализи-

рованное оповещение с развитыми механизмами маршрутизации. Nagios Core в условиях нестабильности сети или некорректной настройки интервалов опроса был склонен к генерации повторных и ложных тревог. PRTG и OpManager показали средние результаты по данному критерию, предоставляя достаточный инструментарий для тонкой настройки порогов и фильтрации событий.

2. Анализ потребления вычислительных ресурсов. Эксперимент по оценке нагрузки на сервер мониторинга при контроле 50 виртуальных машин выявил значительный разброс в потреблении ресурсов CPU, график представлен на рис. 2.

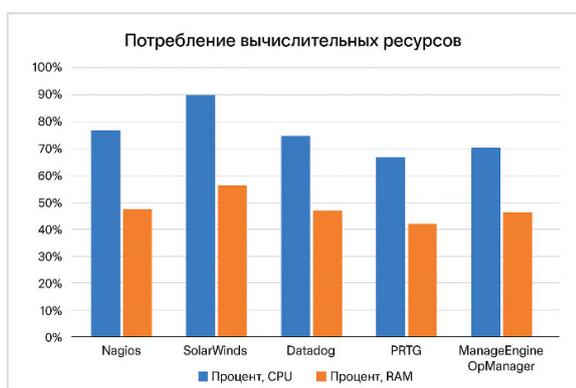


Рис. 2. График потребления вычислительных ресурсов системами мониторинга

Наибольшую пиковую нагрузку на процессор создавала система SolarWinds NPM до 85-90 %, что обусловлено сложностью анализируемых данных – топологией сети, трафиком и объемом кэшируемой информации. Nagios Core показал среднюю загрузку CPU на уровне 70-80 % с кратковременными пиками до 90 %, что объясняется процессом параллельного выполнения многочисленных скриптов-плагинов.

ManageEngine OpManager и Datadog потребляли около 65-70 % и 60-70 % ресурсов CPU соответственно. Наименьшую нагрузку продемонстрировал PRTG – 50-60 %, что свидетельствует об эффективной реализации ядра сбора данных.

В отношении потребления оперативной памяти ситуация была схожей: SolarWinds и OpManager требовали значительных объемов памяти для хранения агрегированных данных и моделей сети, тогда как PRTG и Datadog оказались наиболее экономичными.

Важным наблюдением стала тенденция к накоплению неиспользуемых данных в памяти и деградации производительности у Nagios

Core и PRTG при длительном (более 5 часов) функционировании под нагрузкой, что периодически требовало ручного вмешательства для перезапуска служб [22]. Облачная архитектура Datadog и оптимизированное ядро SolarWinds не продемонстрировали подобных аномалий в течение всего цикла тестирования.

3. Оценка масштабируемости и стабильности. Результаты длительных тестов на стабильность под постоянной нагрузкой с периодической генерацией инцидентов подтвердили гипотезу о влиянии архитектуры на надежность.

Nagios Core проявлял признаки нестабильности, связанные с утечками памяти в сторонних плагинах, что требовало административного вмешательства для восстановления штатной работы. Его коммерческая версия с промо-периодом, Nagios XI, демонстрировала более высокую устойчивость благодаря усовершенствованному бэкенду, однако оставалась ресурсоемкой.

SolarWinds NPM и Datadog не зафиксировали сбоев в работе на протяжении всех испытаний. Для SolarWinds отмечено, что поддержание высокой производительности в сверхкрупных развертываниях требует распределения нагрузки между несколькими серверами сбора. Datadog, будучи SaaS-решением, проблем масштабируемости на стороне клиента не проявил.

PRTG и OpManager сохраняли базовую работоспособность, однако при достижении определенного порога количества метрик – 47 датчиков для PRTG, наблюдалась значительная деградация производительности веб-интерфейса и увеличение интервалов актуализации данных. Для данных систем масштабирование напрямую связано с наращиванием аппаратных мощностей сервера [23].

4. Сравнительный анализ операционной эффективности и пользовательского опыта. Наивысшую оценку за современный пользовательский интерфейс и операционную эффективность получила платформа Datadog. Ее интуитивный веб-интерфейс с интерактивными дашбордами, предустановленными шаблонами и встроенными возможностями для построения карт зависимостей сервисов значительно ускоряет анализ данных и сокращает время на освоение системы.

SolarWinds также обладает развитым графическим интерфейсом, ориентированным на задачи сетевых администраторов. Функции автоматического обнаружения устройств и построения сетевой топологии минимизируют усилия по начальной настройке.

Среди локально развертываемых систем наилучшую простоту первоначального развертывания показал PRTG за счет механизма автоматизации сети. Однако сложность настройки нестандартных проверок и правил оповещения через веб-интерфейс оценивается как повышенная. ManageEngine OpManager, обладая понятным мастером начальной настройки, имеет перегруженный интерфейс, что может затруднять работу неопытных пользователей.

Наименее удобным с точки зрения конфигурирования оказался Nagios Core, требующий ручного редактирования конфигурационных файлов и привлечения сторонних плагинов для расширения функциональности. Его коммерческая версия, Nagios XI, частично компенсирует этот недостаток за счет веб-интерфейса.

Эксперимент по интеграции с системами управления IT-услугами и инструментами DevOps, ServiceNow, показал, что Datadog и SolarWinds обеспечивают наиболее быструю и бесперебойную интеграцию благодаря готовым коннекторам – время создания инцидента меньше 9 секунд. PRTG и OpManager требуют дополнительной настройки вебхуков или использования API, что увеличивает время реакции. Интеграция для Nagios реализуется исключительно сторонними плагинами, что существенно повышает сложность процесса.

Заключение

Проведённое исследование, основанное на экспериментальной оценке ряда систем мониторинга вычислительных ресурсов, позволило сформулировать несколько ключевых выводов научного и практического характера.

1. Научная новизна и вклад. В работе представлен интегрированный подход к сравнительному анализу, объединяющий традиционные измеримые характеристики – латентность обнаружения; потребление ресурсов; масштабируемость с расширенными критериями современной практики – включая возможности AIOps, полноту наблюдаемости, поддержку контейнеризированных сред и интеграцию с инструментами DevOps/ITSM. Метрические нагрузочные испытания и оценка пользовательского опыта обеспечивают воспроизводимую и прикладную методику сравнения.

2. Архитектурное влияние на временные характеристики обнаружения инцидентов. Результаты показывают, что архитектурная модель оказывает решающее влияние на время обнаружения и оповещения. Облачные плат-

формы демонстрируют существенно меньшую латентность при масштабируемых нагрузках благодаря распределённой обработке и асинхронным механизмам сбора данных; системы с периодическим синхронным опросом характеризуются ростом задержек при увеличении числа контролируемых узлов.

3. Зависимость потребления ресурсов от дизайна решения. Эксперименты выявили значительный разброс по нагрузке на CPU и память между исследуемыми продуктами. Решения с детальной сетевой аналитикой и интенсивной агрегацией данных требуют большего объёма вычислительных ресурсов у сервера мониторинга, тогда как оптимизированные сборщики метрик и облачные сервисы распределяют нагрузку более эффективно. Длительное функционирование выявило склонность некоторых локальных систем к деградации производительности из-за накопления данных в памяти или сторонних модулей.

4. Операционная эффективность и удобство эксплуатации. Интерфейсные решения и наличие готовых интеграций существенно сокращают время внедрения и эксплуатационные издержки. Платформы с интуитивными дашбордами и встроенными коннекторами к системам управления инцидентами обеспечивают более высокую оперативную эффективность; локально разворачиваемые продукты выигрывают в автономности, но часто требуют дополнительных усилий по тонкой настройке.

5. Практические рекомендации по выбору решений. На основании комплексной оценки можно рекомендовать следующие практические ориентиры: для небольших инфраструктур – выбирать продукты, обеспечивающие быстрое развертывание и простоту управления; для средних и крупных предприятий – предпочтение отдавать платформам с развитой интеграцией сетевой аналитики и возможностями автоматизации реагирования; при необходимости глубокой наблюдаемости и аналитики инцидентов – рассматривать облачные решения и платформы с AIOps-функционалом. При ограниченных бюджетах и наличии квалифицированной ИТ-команды локальные решения остаются рабочим выбором.

6. Тенденции развития. На основе полученных данных можно утверждать, что дальнейшее развитие инструментов мониторинга будет складываться вокруг двух взаимосвязанных направлений: расширение возможностей автоматизированного анализа и корреляции событий и углубление концепции наблюдаемости

за счёт интеграции метрик, логов и трассировок. Важной становится также совместимость с контейнерами и стандартами телеметрии.

Предложенная методика и полученные эмпирические данные обеспечивают объективную основу для принятия решений об отборе и развитии систем мониторинга в разнообразных контекстах, а также служат ориентиром для дальнейших прикладных и методологических исследований в области наблюдаемости и автоматизации ИТ-операций.

Литература

1. Опыт использования инструментов мониторинга. URL: https://www.reddit.com/r/nagios/comments/k6iwxn/nagios_as_kubernetesdocker_monitoring/ (дата обращения: 14.11.2025).
2. AIOps. Что такое искусственный интеллект для ИТ-операций, URL: <https://www.ibm.com/think/topics/aioops> (дата обращения: 14.11.2025).
3. В чем разница между наблюдаемостью и мониторингом, URL: <https://aws.amazon.com/compare/the-difference-between-monitoring-and-observability/> (дата обращения: 14.11.2025).
4. Руководство по Nagios: непрерывный мониторинг с помощью Nagios Core и XI. URL: <https://phoenixnap.com/blog/nagios-monitoring-tutorial> (дата обращения: 14.11.2025).
5. Nagios Core и Nagios XI: 4 ключевых различия. URL: <https://www.nagios.com/article/nagios-core-vs-nagios-xi/> (дата обращения: 12.01.2025).
6. Система мониторинга с помощью Nagios. URL: <https://wiki.merionet.ru/articles/nagios> (дата обращения: 12.01.2025).
7. Освойте мониторинг Kubernetes с помощью Nagios. URL: <https://library.nagios.com/solutions/kubernetes-monitoring-with-nagios-xi/> (дата обращения: 14.11.2025).
8. Обзор монитора производительности сети SolarWinds. URL: <https://www.comparitech.com/net-admin/solarwinds-network-performance-monitor-review/> (дата обращения: 14.11.2025).
9. Как SolarWinds делает мониторинг сети простым и понятным. URL: <https://www.syssoft.ru/softpower/kak-solarwinds-delaet-monitoring-seti-prostym-i-ponyatnym/> (дата обращения: 14.11.2025).
10. Что такое Datadog – руководство. URL: <https://petri.com/what-is-datadog/> (дата обращения: 14.11.2025).
11. Что такое Datadog, URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/partner-solutions/datadog/overview> (дата обращения: 14.11.2025).
12. Google Cloud. Datadog. URL: <https://cloud.google.com/datadog> (дата обращения: 14.11.2025).
13. PRTG. URL: <https://www.paessler.com/prtg> (дата обращения: 14.11.2025).
14. PRTG. Руководство: Добро пожаловать в PRTG Network Monitor. URL: <https://prtg.inti.net.id/help/introduction.htm> (дата обращения: 14.11.2025).
15. Руководство PRTG: Мониторинг через SNMP. URL: https://www.paessler.com/manuals/prtg/monitoring_via_snmp (дата обращения: 14.11.2025).
16. Программное обеспечение и решения для мониторинга сети – ManageEngine OpManager. URL: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/> (дата обращения: 14.11.2025).
17. Обзор ManageEngine OpManager. URL: <https://picktech.ru/product/manageengine-opmanager/> (дата обращения: 14.11.2025).
18. Мониторинг сетевого потока NetFlow. URL: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/netflow-monitoring.html> (дата обращения: 14.11.2025).
19. Документация Datadog – Docs APM. URL: <https://docs.datadoghq.com/tracing/> (дата обращения: 14.11.2025).
20. Рекомендации по масштабируемости продуктов SolarWinds. URL: https://documentation.solarwinds.com/en/success_center/orionplatform/content/orion_platform_scalability_engine_guidelines.htm (дата обращения: 14.11.2025).
21. Настройка Nagios для максимальной производительности. URL: <https://assets.nagios.com/downloads/nagioscore/docs/nagioscore/4/en/tuning.html> (дата обращения: 14.11.2025).
22. Причины высокого использования памяти PRTG. URL: <https://helpdesk.paessler.com/en/support/solutions/articles/76000082054-what-can-i-check-in-the-case-of-high-memory-usage-> (дата обращения: 14.11.2025).
23. OpManager – системные требования. URL: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/help/hardware-and-software-requirements.html> (дата обращения: 14.11.2025).

Поступила 17.11.2025; принята к публикации 26.01.2026

Информация об авторе

Жуманиязов Худойберган Максуд Угли – аспирант, Вологодский государственный университет (160000, Россия, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15), e-mail: jexams@ya.ru

Comparative analysis of software solutions for monitoring the state of computational resources in organizations

Kh.M. Zhumaniazov

Vologda State University, Vologda, Russia

Abstract. The article proposes a reproducible field-testing methodology for the comparative analysis of monitoring systems for computing resources, taking into account advanced practical criteria: AIOps capabilities, level of observability, container support, and integration with DevOps/ITSM. We developed a unified testbed and a set of experimental scenarios: scala-

bility and load tests, incident-response tests, long-term stability assessment, and evaluation of operational efficiency and user experience. We performed experiments on virtual machines with controlled node counts (10-50 VMs) using synthetic load and targeted failure simulations. Objective metrics included detection and notification latency, CPU and memory consumption, metric-collection throughput, false-alarm rate, performance degradation under prolonged load, deployment and configuration time, and quality of interfaces and integrations. Based on empirical data, we carried out a comparative analysis of popular on-premises and cloud solutions; we identified architectural causes of differences in latency and scalability, and we demonstrated trade-offs between the autonomy of on-premises systems and the convenience of cloud platforms with AIOps. We provide practical recommendations.

Keywords: computing resource monitoring; observability; AIOps; containerized environments; scalability; incident detection latency; cloud and on-premises solutions; comparative analysis of monitoring systems

References

1. Experience in using monitoring tools, available at: https://www.reddit.com/r/nagios/comments/k6iwxn/nagios_as_kubernetesdocker_monitoring/ (date of access: 14.11.2025).
2. What is AIOps, available at: <https://www.ibm.com/think/topics/aiops> (accessed 14.11.2025).
3. What's the Difference Between Observability and Monitoring, available at: <https://aws.amazon.com/compare/the-difference-between-monitoring-and-observability/> (date of access: 14.11.2025).
4. Nagios Tutorial: Continuous Monitoring with Nagios Core and XI, available at: <https://phoenixnap.com/blog/nagios-monitoring-tutorial> (date of access: 14.11.2025).
5. Nagios Core vs. Nagios XI: 4 Key Differences, available at: <https://www.nagios.com/article/nagios-core-vs-nagios-xi/> (date of access: 14.11.2025).
6. Monitoring system using Nagios, available at: <https://wiki.merionet.ru/articles/nagios> (date of access: 14.11.2025).
7. Master Kubernetes monitoring using Nagios, available at: <https://library.nagios.com/solutions/kubernetes-monitoring-with-nagios-xi/> (date of access: 14.11.2025).
8. SolarWinds Network Performance Monitor Review, available at: <https://www.comparitech.com/net-admin/solarwinds-network-performance-monitor-review/> (date of access: 14.11.2025).
9. How SolarWinds makes network monitoring simple and straightforward, available at: <https://www.syssoft.ru/softpower/kak-solarwinds-delaet-monitoring-seti-prostym-i-ponyatnym/> (date of access: 14.11.2025).
10. What is Datadog – The Ultimate Guide, available at: <https://petri.com/what-is-datadog/> (date of access: 14.11.2025).
11. What is Datadog, available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/partner-solutions/datadog/overview> (date of access: 14.11.2025).
12. Google Cloud. Datadog, available at: <https://cloud.google.com/datadog> (date of access: 14.11.2025).
13. PRTG, available at: <https://www.paessler.com/prtg> (date of access: 14.11.2025).
14. PRTG Manual: Welcome to PRTG Network Monitor, available at: <https://prtg.inti.net.id/help/introduction.htm> (date of access: 14.11.2025).
15. PRTG Manual: Monitoring via SNMP, available at: https://www.paessler.com/manuals/prtg/monitoring_via_snmp (date of access: 14.11.2025).
16. Network Monitoring Software & Solutions – ManageEngine OpManager, available at: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/> (date of access: 14.11.2025).
17. ManageEngine OpManager Overview, available at: <https://picktech.ru/product/manageengine-opmanager/> (date of access: 14.11.2025).
18. NetFlow monitoring, available at: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/netflow-monitoring.html> (date of access: 14.11.2025).
19. Datadog – Docs APM, available at: <https://docs.datadoghq.com/tracing/> (accessed 14.11.2025).
20. Scalability engine guidelines for SolarWinds products, available at: https://documentation.solarwinds.com/en/success_center/orionplatform/content/orion_platform_scalability_engine_guidelines.htm (accessed 14.11.2025).
21. Tuning Nagios For Maximum Performance, available at: <https://assets.nagios.com/downloads/nagioscore/docs/nagioscore/4/en/tuning.html> (date of access: 14.11.2025).
22. Reasons for High Memory Usage on PRTG Servers, available at: <https://helpdesk.paessler.com/en/support/solutions/articles/76000082054-what-can-i-check-in-the-case-of-high-memory-usage-> (date of access: 14.11.2025).
23. OpManager – System Requirements, available at: <https://www.manageengine.com/network-monitoring/help/hardware-and-software-requirements.html> (date of access: 14.11.2025).

Submitted 17.11.2025; revised 26.01.2026

Information about the author

Khudoibergan M. Zhumaniazov, postgraduate Student, Vologda State University (15 Lenina str., Vologda 160000, Russia), e-mail: jexams@ya.ru

Широкополосный пеленгационный комплекс на основе программно-определяемого радио

Е.Д. Егорова¹, Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается возможность реализации высокоточного комплекса пеленгации секторального обзора на основе программно-определяемого радио Pluto+ SDR. Особенностью предлагаемого комплекса пеленгации является простота реализации, а также высокая степень повторяемости компонентов, что особенно важно для минимизации фазовой ошибки, которая возникает в процессе измерения характеристик электромагнитных волн. Для оценки эффективности работы комплекса пеленгации проводились измерения основных характеристик комплекса при разных уровнях сигнала, а также ошибках, которые могут возникать при настройке антенно-фидерного тракта пеленгатора. Цели данного исследования: разработать и изучить комплекс пеленгации на основе программно-определяемого радио; сформировать антенно-фидерный тракт комплекса радиопеленгации; провести измерения комплекса в условиях разного уровня сигналов. В процессе разработки использовался язык программирования Python; моделирование антенн проводилось в DS CST Studio Suite 2024; трехмерные детали выполнялись путем применения аддитивных технологий; экспериментальные измерения выполнялись с использованием векторного анализатора цепей, эталонного генератора. Новизна предлагаемой конструкции заключается в реализации комплекса пеленгации на основе компактного SDR приемника Pluto+ с реализацией программной части на языке Python с реализованным функционалом автоматического определения наличия сигнала, спектрального анализатора, что повышает эффективность определения пеленга на источник радиоизлучения. Предложенная конструкция проста в производстве, а также обеспечивает высокую повторяемость, что особенно важно для комплексов радиопеленгации. Практическая значимость заключается в создании компактного простого в реализации комплекса радиопеленгации на основе программно-определяемого радио с антенным комплексом на основе двух логопериодических антенн. Важно отметить актуальность и важность реализации малых пеленгационных комплексов. В процессе исследования были рассмотрены факторы, которые оказывают влияние на точность определения пеленга электромагнитной волны.

Ключевые слова: пеленгация; программно-определяемое радио; широкополосный пеленгатор; Adalm Pluto

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

Введение

Реализация пеленгационных комплексов – важная и актуальная задача, так как они позволяют обнаруживать источники радиоизлучения. Пеленгация электромагнитных волн применяется при обнаружении высокоомобильных объектов, радиопередатчиков, а также при определении области покрытия базовых станций. Пеленгация объектов может осуществляться как по всей азимутальной плоскости, так и в определенном секторе, что позволяет снизить шумовую нагрузку на комплекс радиопеленгации, чем повышается точность пеленгации. Наиболее важными характеристиками любых комплексов пеленгации является диапазон рабочих частот, а также точность и сектор, в которых

может быть эффективно определен пеленг антенной системы [1]. Для реализации широкополосных комплексов пеленгации особенно актуальной задачей является выбор антенной системы, которая должна обладать наиболее высоким уровнем коэффициента направленного действия (КНД), а также диапазоном рабочих частот. Типовыми антеннами для реализации кольцевых комплексов радиопеленгации выступают биконические антенные элементы, однако ввиду их всенаправленного излучения необходимо решить задачу различения сигналов, что требует математической обработки измерения. Другим способом реализации пеленгационного комплекса выступают системы на основе логопериодических антенн [2], которые обладают высоким уровнем КНД, а также широким диапазоном частот.

В процессе реализации любого комплекса радиопеленгации также возникает задача расположения антенных элементов в решетке с наиболее оптимальным разнесением. Наиболее простым методом построения антенной системы для комплекса пеленгации является разнесение антенных элементов на расстояние в половину длины волны, но стоит учитывать, что фронт электромагнитной волны не всегда приходит на комплекс пеленгации с оптимальными значениями, что может вызывать дополнительные ошибки при расчете пеленга волны на основе ее фазовых значений, как это показано в работе [3]. Следующей проблемой, которая возникает при разработке комплексов пеленгации, является синхронизация и согласование всех размеров антенного и фидерного тракта. Так как любой комплекс радиопеленгации работает с малыми уровнями сигналов, а также с фазовыми значениями принятых сигналов, то система становится очень чувствительна к любым искажениям и рассогласованиям, которые могут быть вызваны разностью длины коаксиальных линий или особенностями изготовления антенн. Для решения данной проблемы вводится специальный поправочный (калибровочный) коэффициент, который позволяет исправить постоянную ошибку, которую можно учитывать как математическое ожидание ошибки пеленга [4]. В работе [5] авторы приводят пример комплекса пеленгации на основе направленных антенн, которые позволяют определять основные характеристики сигналов, а также рассматривают процесс калибровки комплекса пеленгации в условиях обнаружения электромагнитных волн в идеальных условиях.

Одним из наиболее востребованных и передовых методов реализации малых и дешевых пеленгационных комплексов выступают системы на основе программно-определяемого радио (SDR). Большинство таких радиоприемников реализуются на основе программно-аппаратных комплексов, которые могут быть запрограммированы на основных языках программирования, как Python, C++, C. Однако базовым и наиболее простым является реализация на основе комплекса GNU Radio. Пример такой реализации приводится в работе [6], однако важно отметить, что для реализации полноазимутального сканирования авторам работы пришлось сделать сложное коммутирующее устройство, которое выполняет обзор путем переключения антенных выходов, что также приводит к росту ошибок при расчете пеленга источника радиоизлучения (ИРИ),

особенно такая проблема возникает при пеленгации высококомобильных целей, как это показано в работе [7]. Для решения данной проблемы предлагается использовать двухантенную секторальную пеленгационную систему, которая может быть реализована на простом SDR-приемнике, как это показано в [8, 9]. Однако остается проблема выбора наиболее оптимальной антенной системы для комплекса радиопеленгации, которая позволит обеспечить наибольшую повторяемость, а также простоту изготовления.

Наиболее простыми с точки зрения изготовления и реализации являются антенны, которые выполнены по печатной технологии. Особенности таких антенн являются их простота и скорость изготовления, повторяемость, что особенно важно при реализации пеленгационных антенн, однако такие антенны имеют недостаток, который вызван потерями в диэлектриках. Для комплексов радиопеленгации антенная система должна обладать широким диапазоном рабочих частот, а также стабильной диаграммой направленности. Таким образом, можно отметить, что наиболее оптимальными могут являться логопериодические антенны, которые выполняются на основе печатной технологии, особенно в случаях, когда антенна предназначена для секторального комплекса пеленгации [10, 11].

В данной работе рассматривается комплекс пеленгации на основе программно-определяемого радио Adalm Pluto SDR, который осуществляет прием сигналов на два входных канала, подключенных к двум логопериодическим антеннам с последующей обработкой на основе программы, которая написана на языке Python. Применение предлагаемой системы позволяет обеспечить пеленгацию высококомобильных целей, а также сигналов в широком диапазоне рабочих частот.

Описание принципов пеленгации, а также реализованных дополнительных функций в программном коде для Pluto SDR

Комплекс радиопеленгации на основе SDR радио представляет из себя программно-аппаратный комплекс, который состоит из SDR приемника (в нашем случае Pluto+ (аналог Adalm Pluto от Analog Devices)) и антенно-фидерного компонента (в него входят две коаксиальные линии и две антенны, а также перестраиваемая база для установки расстояния между антеннами). С точки зрения реализации

математического процесса определения характеристик пеленга SDR приемник работает в двухканальном режиме (используется два приемных канала). С точки зрения реализации пеленгатора на языке Python два приемных канала имеют обозначение $sdr.rx()$, которые после приема определяются в два массива данных Rx_0 для первого канала и Rx_1 для второго. Принятый сигнал программно-аппаратным радио представляется в комплексной форме, что позволяет определить основные характеристики сигнала для последующего расчета пеленга электромагнитной волны:

$$Rx_n = Am \cdot \exp(j \cdot ph), \quad (1)$$

где n – номер канала SDR-радио;

Am – амплитуда сигнала (модуль комплексного числа);

ph – фаза сигнала (аргумент).

Стоит также отметить, что приоритетно в процессе работы программы применяется расчет фазы в радианах, поэтому используются функции из языка Python $deg2rad$ и $rad2deg$.

После приема сигналов происходит сравнение принятых сигналов путем смежного сложения и нахождения разности сигналов в каналах. Для выполнения данной операции вводится переменная шага сканирования, которая будет комплексно добавляться к характеристикам сигнала, измеренного вторым каналом. Помимо введения переменной на данном этапе выполнения математической модели также вносится поправочный (калибровочный) коэффициент для комплекса пеленгации, который направлен на борьбу с неоднородностью каналов. Таким образом, после добавления переменной и поправочного коэффициента вид сигнала с канала 2 будет иметь вид:

$$\xi_{Rx_1} = Rx_1 \cdot \exp(j \cdot (\sigma_p + \sigma_c)), \quad (2)$$

где ξ_{Rx_1} – смещенный сигнал с канала 2;

Rx_1 – изначальный сигнал с канала 2;

σ_p – переменная фаза, которая используется для определения отличия сигналов (в программе определяется как диапазон от -180° до 180° с шагом в 2°);

σ_c – коэффициент калибровки пеленгатора, который позволяет исправлять неоднородность антенно-фидерного тракта.

После получения нового сигнала со 2 канала с динамически изменяемой фазой на основе переменной происходит расчет одновре-

менно двух выражений, которые определяют суммарное значение сигналов и их разность:

$$\Sigma = Rx_0 + \xi_{Rx_1}, \quad (3)$$

$$\Delta = Rx_0 - \xi_{Rx_1}. \quad (4)$$

Таким образом, получается два значения сигналов – их сумма и разность. Так как антенная система представляет из себя антенную решетку с изначально известной (настроенной) базой – расстоянием между антеннами, то направление прихода источника радиоизлучения будет соответствовать ситуации, когда суммарный сигнал будет устремляться к максимуму ($\Sigma \rightarrow max$), а их разность к минимуму ($\Delta \rightarrow min$). В идеальном случае уровень максимума будет соответствовать удвоенному сигналу с канала 1, а разность будет соответствовать нулю. Для ускорения анализа и точности работы радиопеленгатора в программном коде выполняется перевод сигнала суммы и разности в логарифмическую шкалу, однако важно отметить, что сигнал, выраженный в логарифмической шкале, будет иметь единицу измерения dBFS.

dBFS или децибел полной шкалы определяется на основе стандарта AES17 и определяет измерения в цифровой области обработки сигналов, так как сигнал будет иметь среднеквадратическую величину в рассматриваемой относительной полосе. Так, максимальный уровень сигналов в такой шкале определяется в первую очередь от числа сэмплов, которые будет определять система SDR. Однако в нашем случае нас интересует логарифмическая шкала благодаря возможности описания суммы или разности сигналов. Теоретически возможным максимальным значением суммы сигнала в такой шкале будет уровень 0 dBFS, при этом минимум соответствует $-\infty$ dBFS. Зная эти два уровня, программа начитает выполнять перебор значений на основе изменения фазы до момента, когда разница между Σ и Δ не станет максимальной. При этом важно отметить, что помимо максимальной разницы уровней сигналов в точке, которая соответствует ИРИ будет наблюдаться скачок разности фаз для суммарного и разностного сигналов. Таким образом, можно установить пеленг электромагнитной волны, который и будет соответствовать значению σ_p , когда достигается максимум разницы между Σ и Δ . Далее данная программа выполняется циклически, передавая результат на график пеленга.

Отметим, что с точки зрения реализации комплекса пеленгации необходимо выбрать базовые настройки, которые будут описывать комплекс пеленгации:

1) Частота дискретизации (*sample rate*) = 20 МГц;

2) Число сэмплов (*number samples*) = 10 000;

3) Стартовая частота пеленгатора (*rx_lo*) = 1320 МГц;

4) Усиление каналов (*rx_gain*) = 40 дБ (важно отметить, что уровень усиления не влияет на предельную чувствительность комплекса пеленгации по отношению к уровню отношения сигнал/шум (ОСШ), так как одинаково будет усилен как полезный сигнал, так и шум; а следовательно уровень ОСШ не изменится);

5) Калибровка пеленгатора (*phase_cal*) = 0° (изначально данное значение равно 0, однако в случае возникновения постоянной ошибки данное значение может быть изменено для калибровки пеленгатора);

6) Расстояние между антеннами или база пеленгатора – в нашем случае половина длины волны ($\lambda/2$).

Данные параметры позволяют реализовать базовый функционал комплекса пеленгации, однако для улучшения работы был реализован ряд дополнительных возможностей.

Первой такой дополнительной возможностью является построение спектра сигнала в

полосе обзора, которая равна частоте дискретизации, в нашем случае 20 МГц. Спектр определяется на основе быстрого Фурье преобразования принятого сигнала, при этом спектр строится на основе сигнала, который измеряет 1 канал (*Rx_0*). Измеренный спектр графически выводится в пользовательский интерфейс. Отметим, что сигнал на частоте пеленгации при его наличии будет отчетливо выделяться на спектральном графике.

Вторая функция направлена на выбор частоты пеленгации в случае, когда априорная частота электромагнитной волны не известна. Программа выполняет сканирование частотного спектра в заданной полосе с заданным шагом, после чего запоминается пик (максимум) сигнала и его частота, после чего пеленгатор перейдет в автоматическое обнаружение данного сигнала. Помимо возможности сканирования доступна также возможность ручного ввода частоты пеленгации в случае, когда она априорно известна.

Так как частота сигнала напрямую связана с настройками пеленгатора, а именно его базы, то программа также будет отображать настройки базы пеленгатора, которые требуется установить для верного вычисления пеленга. На рис. 1 приводится интерфейс программы пеленгатора, разработанного на основе Pluto+, а также языка программирования Python.

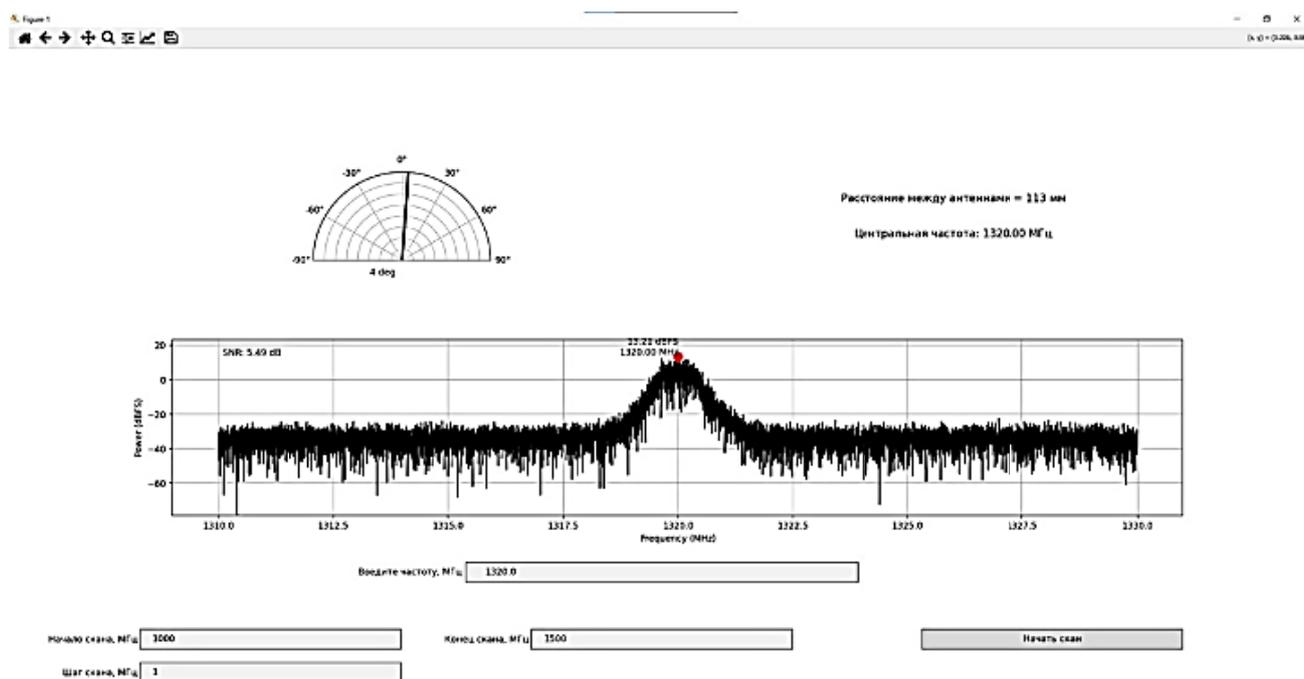


Рис. 1. Интерфейс комплекса пеленгации на основе программно-определяемого радио: левый верхний угол – значение пеленга на полярной системе координат; правый верхний угол – настройки комплекса пеленгации; нижняя область – спектроанализатор, а также настройки сканирования частоты

Таким образом, были рассмотрены основные принципы формирования комплекса пеленгации на основе программно-определяемого радио (SDR). Рассмотрим основные характеристики антенно-фидерной части комплекса пеленгации.

Конструкция антенно-фидерного комплекса антенной системы для комплекса пеленгации

Как уже было сказано ранее, комплекс радиопеленгации в нашем случае состоит из двух основных частей – программно-определяемого радио, которое выполняет программный код и осуществляет обработку сигналов. Для приема и передачи электромагнитных волн применяется антенно-фидерный комплекс, который состоит из двух коаксиальных кабелей (имеют полностью равную длину для минимизации фазовой ошибки), а также двух логопериодических антенн. На рис. 2 приводится вид комплекса радиопеленгации.

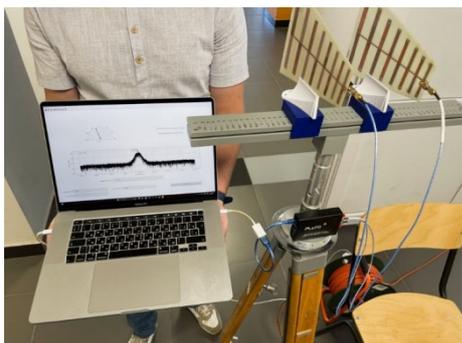
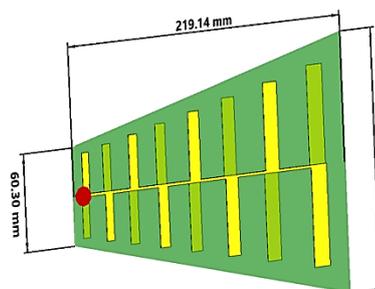


Рис. 2. Комплекс радиопеленгации, состоящий из SDR Pluto+, антенно-фидерного блока и ноутбука

Особенностью используемой платформы SDR и языка программирования Python является возможность работы на любых операционных системах – Windows, Linux, macOS. Также стоит отметить, что для того, чтобы сформировать перестраиваемую базу антенного комплекса применялись аддитивные технологии. Основная направляющая с градуированной шкалой была напечатана на 3D-принтере Picaso Designer XL Series 2 из АБС-пластика, что позволило достичь длины базы в 600 мм, а подвижные каретки выполнялись из PETG пластика, чтобы минимизировать их износ и достичь жесткости и фиксации на уровнях. Основные направляющие антенн были изготовлены из PLA+ пластика, как так он позволяет минимизировать потери ввиду малого заполнения, а также минимальной усадки по

сле печати (печать выполнялась на принтерах Flying Bear Ghost 6 и Bambu Lab X1 Carbon). Такая направляющая позволяет обеспечить быструю настройку базы пеленгатора для минимизации фазовых ошибок, а также установить пеленгатор на штатив.

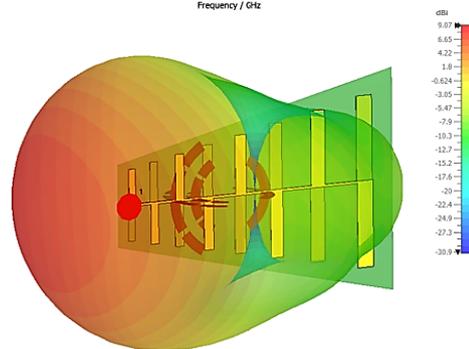
Рассмотрим основные характеристики антенн, которые используются в разработанном комплексе пеленгации. В процессе разработки был сделан выбор в пользу использования двух логопериодических антенн, которые изготавливаются по печатной технологии, как в работах [2, 11]. Особенности таких антенн является их простота реализации и повторяемость, что особенно важно для комплексов радиопеленгации. Для моделирования антенны использовалось программное обеспечение DS CST Studio Suite 2024. На рис. 3 приводится вид модели антенны, а также основные характеристики, которые были получены в процессе моделирования.



а)



б)



в)

Рис. 3. Результаты моделирования логопериодической антенны: а) трехмерная модель антенны; б) возвратные потери антенны; в) диаграмма направленности антенны

Полученные результаты моделирования показывают, что антенна обеспечивает эффективную работу в диапазоне от 890 до

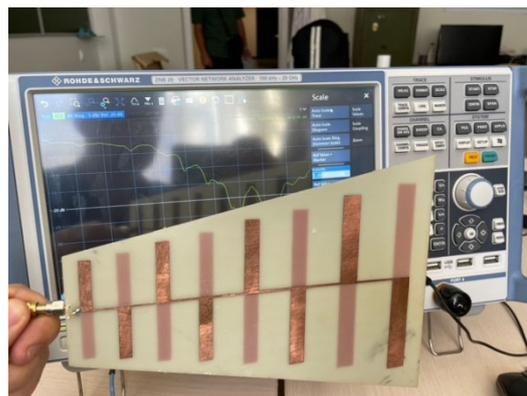
1440 МГц, что позволяет сформировать широкополосный диапазон рабочих частот для пеленгационного комплекса. Антенны были изготовлены на основе двустороннего фольгированного стеклотекстолита Fг-4 толщиной 1 мм. Для того, чтобы оценить характеристики изготовленных антенн выполнялись измерения. Одним из наиболее важных являлось измерение диаграммы направленности, так как при измерении характеристик поля важную роль играет фазовый центр антенны, а у логопериодических антенн он постоянно смещается от частоты. Для измерения диаграммы направленности изготовленной антенны было важно определить дальнюю зону поля (зону Фраунгофера) ввиду отсутствия безэховой камеры:

$$R_{FF} = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (5)$$

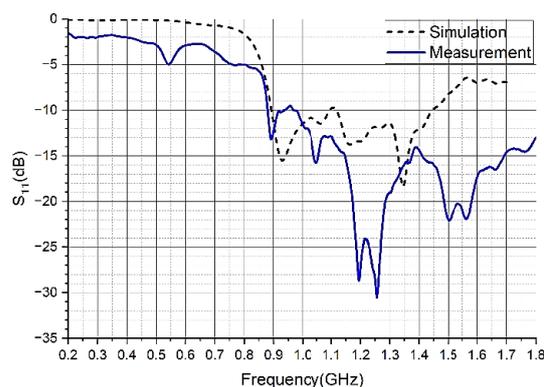
где R_{FF} – расстояние до зоны Фраунгофера;

D – максимальный габаритный размер антенны (в нашем случае 219 мм);

λ – длина волны (на целевой частоте в 1300 МГц составляет 230 мм). Таким образом, в нашем случае дальняя зона поля будет достигнута на расстоянии более 417 мм или 41 см. В процессе измерений диаграммы направленности было выбрано расстояние в 10 м (10 000 мм), что позволяет минимизировать переотражения, вызванные окружающими объектами. Для измерения диапазона рабочих частот изготовленной антенны был использован векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZNB20, а для измерения характеристик диаграммы направленности применялась система, которая состояла из эталонного генератора (Siglent/АКИП-3209), который был подключен к эталонной антенне, а измеряемая (тестовая) антенна устанавливалась на поворотный штатив и подключалась к спектральному анализатору (Siglent/АКИП-4213/1), после чего выполнялось измерение направленности. На рис. 4 приводится вид процесса измерения, а также результаты измерений, которые сравниваются с результатами моделирования.



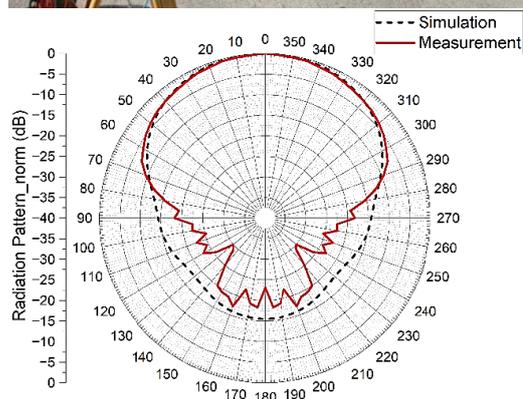
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Процесс измерения характеристик антенны: б) возвратные потери (измеренные и полученные в процессе моделирования); в) процесс измерения диаграммы направленности; г) сравнение диаграммы направленности (нормированные измеренные и полученные в процессе моделирования)

Полученные результаты показывают, что изготовленные антенны обладают диапазоном рабочих частот от 879 до 1800 МГц, что соответствует целевому диапазону для комплекса пеленгации; при этом диаграмма направленности обладает широким главным лепестком в 80° по уровню половинной мощности, что позволяет ожидать диапазон определения пеленга в секторе от -40 до 40 градусов с высокой точностью.

Таким образом, можно отметить, что выбранная конструкция комплекса пеленгации проста в реализации, обеспечивает высокую повторяемость, а также проста в настройке. Достижение данных эффектов возможно благодаря использованию высокоэффективного программно-определяемого радио, фидерного тракта из двух коаксиальных линий равной длины, а также логопериодических антенн, изготовленных на основе печатной технологии.

Для разработанного комплекса пеленгации проводились основные измерения характеристик, а также оценивалась точность определения пеленга при разных уровнях отношения сигнал/шум, внедрению фазовой ошибки, вызванной смещением фазовых центров антенн, а также ошибкой в настройке базы антенны.

Измерение основных характеристик разработанного пеленгационного комплекса

В процессе испытания разработанного комплекса пеленгации производилась оценка основных характеристик. В роли источника излучения выступал эталонный генератор Siglent/АКИП-3209, который запитывал логопериодическую эталонную антенну, выступающая в роли цели. Измерения проводились во дворе первого корпуса ВГТУ, поэтому дальность испытаний была ограничена 35 метрами, при этом проблема ограниченности дальности решалась путем снижения мощности генератора. На рис. 5 приводится вид процесса измерений комплекса радиопеленгации.

В процессе измерения на эталонном генераторе был выбран стандартный сигнал, у которого была возможность изменять частоту и уровень. Частота сигнала составляла 1320 МГц, а уровень сигнала варьировался от 0 до -70 дБмВт (dBm). Первый этап измерений был направлен на выявление предельной дальности, на которой сохраняется ошибка пеленга менее 10 градусов. В процессе измерения было получено, что предельное разрешение пеленгатора в азимутальной плоскости составляло от -45 до 45 градусов, при этом ошибка увели-

чивалась на краевых значениях, что вызвано взаимным влиянием антенн.



Рис. 5. Измерение характеристик комплекса радиопеленгации: а) вид на источник радиоизлучения; б) вид с позиции радиоизлучения на пеленгатор, дистанция 35 метров

Измерения пеленгатора на дальность проводились до случая, когда средняя ошибка пеленга по всем углам превысила 10 градусов. Измерения выполнялись в секторах от -45 до 45 градусов с шагом в 5 градусов (ограничения поворотного штатива – минимальная цена деления шкалы). При установке уровня сигнала на эталонном генераторе в 0 dBm было установлено, что дальности в 35 метров недостаточно, так как соблюдается высокая точность пеленгации. Путем постепенного понижения уровня сигнала было установлено, что высокая точность пеленгации с ошибкой менее 10 градусов сохраняется до уровня сигнала на эталонном генераторе в -65 dBm, что соответствует уровню сигнала в 0.000000003 Вт ($0.3 \cdot 10^{-9}$ Вт). Данный уровень показывает, что разработанный комплекс радиопеленгации позволяет выполнять обнаружение источников радиоизлучения с высокой точностью на больших расстояниях.

Следующим исследованием рассматривалась точность обнаружения при разных уровнях отношения сигнал/шум, которое определялось по встроенному в программное обеспечение пеленгатора спектроанализатору путем

нахождения разности уровней между сигналом и шумом. В процессе измерений расстояние между источником радиоизлучения и комплексом пеленгации было установлено в 10 метров, чтобы минимизировать влияние окру-

жающих объектов, при этом сохранить дальнюю зону поля. В табл. 1 приводятся результаты измерений, которые были получены при разных уровнях отношения сигнал/шум.

Таблица 1

Характеристики пеленгации при разных уровнях отношения сигнал/шум

ИРИ \ ОСШ	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Уровень генератора, dBm
45	0	5	10	15	20	25	28	32	38	43	0
41	0	5	8	14	19	24	30	33	40	43	-25
35	0	5	10	14	18	24	28	32	36	42	-40
30	0	5	10	15	20	24	28	33	39	43	-50
15	0	5	10	15	20	24	30	35	39	44	-60
10	0	5	11	17	20	24	32	34	37	40	-65
7	1	6	10	15	20	24	30	34	44	42	-70
5	3	8	16	19	27	30	48	70	75	80	-73

Как видно по полученным результатам пеленгационный комплекс обеспечивает высокую точность пеленгации при уровне отношения сигнал/шум в 7 дБ. На рис. 6 приводится график зависимости средней ошибки пеленга в исследуемом диапазоне углов при разных уровнях отношения сигнал/шум.

Следующим этапом исследования была оценка стабильности характеристик комплекса пеленгации при ошибках в настройке комплекса. Ошибки могут возникать в двух основных случаях – неверный выбор базы пеленгатора или неверная установка антенн (рассогласование фазовых центров). В процессе исследования влияния расстояния между антеннами на источнике радиоизлучения был зафиксирован уровень в -20 dBm, центральная частота составляла 1320 МГц, что соответствовало базе пеленгатора в 113 мм. Измерения проводилось при направлении ИРИ в 0 градусов, так как данная ситуация является наиболее простой в определении величины пеленга. В табл. 2 приводятся результаты измерений при разных значениях базы комплекса пеленгации.

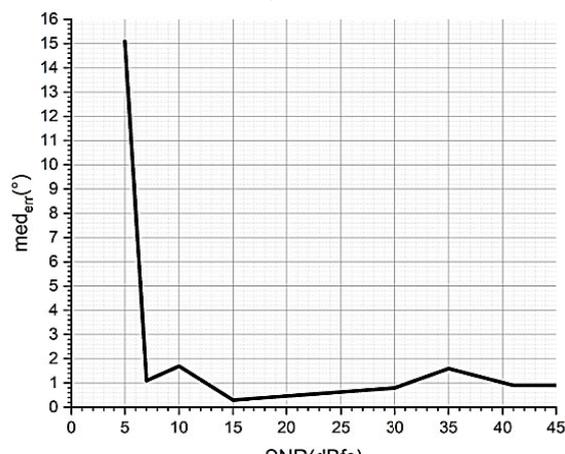
Таблица 2

Зависимость ошибки пеленга от базы пеленгатора (ИРИ=0°, частота 1320 МГц)

База пеленгатора, мм	Ошибка пеленга, °
113	0
15	1
119	3
145	-2
160	-5
180	7
200	8
240	9
260	11
295	12
485	14



а)



б)

Рис. 6. Измерение характеристик пеленгатора при разных уровнях отношения сигнал/шум: а) процесс проведения измерений на расстоянии в 10 метров; б) зависимость средней ошибки от уровня ОСШ

Полученные результаты показывают, что в процессе установления базы пеленгатора допустима небольшая ошибка, которая не вызывает большой ошибки определения пеленга, при этом при больших отклонениях базы пеленгатора ошибка начинает нарастать, что вы-

Таблица 3

Зависимость ошибки пеленга от взаимного смещения антенн

ИРИ, ° \ Смещение, мм	ИРИ, °		
	0	10	20
0	0	10	20
2.5	-3	-13	-22
5.0	-5	-14	-22
25	10	1	-6
70	27	17	8

звано ростом фазовой ошибки измеренного сигнала в процессе обработки сигнала. Следующим этапом исследований было изучение важности параллельной установки антенн, так как особенностью логопериодических антенн является то, что их фазовый центр постоянно смещается в процессе изменения частоты измерения. Роль фазового центра антенны очень важна, так как относительно этой точки определяется фаза сигнала, на основе которой выполняется пеленгация. В процессе исследования производилось смещение одной из антенн относительно другой, как это показано на рис. 7.



Рис. 7. Оценка влияния положения фазовых центров антенн на точность определения пеленга: а) положение антенного комплекса радиопеленгатора без смещения; б) смещение логопериодических антенн в процессе исследования

В процессе исследования производилось измерение пеленга при углах прихода ИРИ в 0, 10, 20 градусов и разных смещениях антенн относительно друг друга. Результаты измерений приводятся в табл. 3.

Полученные результаты показывают, что пеленгационный комплекс является чувствительным к фазовой ошибке, которая вызвана нарушением положения антенн. Смещение антенн относительно друг друга даже на малое расстояние приводит к резкому росту ошибки пеленга, таким образом, важно отметить важность параллельной установки антенн для минимизации ошибки пеленгации, однако можно заметить, что при небольшом смещении антенн друг относительно друга возникает постоянная ошибка, которая может быть исправлена путем внесения фазовой поправки (калибровочного) коэффициента.

Заключение

Рассмотренный в данной работе комплекс радиопеленгации на основе SDR позволяет с высокой точностью определять пеленг источника радиоизлучения в секторе от -45 до 45 градусов, что соответствует суммарной области пространства в 90 градусов (4 комплекса охватят 360 градусов). Благодаря использованию печатных логопериодических антенн появляется возможность расширить диапазон рабочих частот, а также повысить повторяемость антенных элементов при их изготовлении. Реализованные в программном коде возможности позволяют обеспечить автоматическое обнаружение источника радиоизлучения, вносить поправочный коэффициент для решения проблемы фазового рассогласования, а также анализировать спектр сигналов, изготовленные аддитивными методами компоненты позволяют обеспечить гибкость, а также масштабируемость разработанного комплекса. Важно также отметить, что диапазон рабочих частот разработанного комплекса пеленгации определяются диапазоном рабочих частот SDR приёмника, а также диапазоном рабочих частот антенны, при этом логопериодическая антенна может обладать очень широким диапазоном рабочих частот, однако при этом ее раз-

меры будут увеличиваться. Проведенный в работе анализ разработанного комплекса пеленгации показывает широкий спектр его применения, а также возможность определения целей при малых уровнях отношения сигнал/шум.

Литература

1. The Rohde & Schwarz. An Introduction to Direction Finding Methodologies: White Paper. 2020. 26 p.
2. Development of Radio Direction Finder using 6 Log Periodic Dipole Array Antennas / K.N.J. Purwanto [et al.] // 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). 2018. pp. 157-160.
3. Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies / J.-H. Lee [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17. No. 4. pp. 563-566.
4. Hidayat S. Calibration of direction finder // 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2012. pp. 95-97.
5. Bergzen H. A novel concept for a tactical HF direction finder // The Institution of Engineering and Technology

11th International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009). 2009. pp. 1-4.

6. Direction Finding System using an N-Channel Software Defined Radio Implemented with a Phase Interferometry Algorithm / S. Skinner [et al.] // 2019 SoutheastCon. 2019. pp. 1-5.

7. Xiao W., Fan Q., Li X., Xiong Z., Zhang J. Control Strategy of Ground Target Tracking for Fixed-wing UAV / W. Xiao [et al.] // 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). 2018. pp. 1-4.

8. Anggraeni M.E., Handayani P., Hendranto G. Double-directional outdoor MIMO channel measurement at 2.4 GHz using SDR // 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). 2016. pp. 255-260.

9. Лазарев В.О., Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 88–100.

10. Pehlivan M., Yeğın K., Aşçı Y. Design of 1–18 GHz parabolic reflector antenna with LPDA feed // 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR). 2016. pp. 1-3.

11. Limpiti T., Chantaveerod A.Y. Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz band applications // 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2016. pp. 1-4.

Поступила 08.10.2025; принята к публикации 01.12.2025

Информация об авторах

Егорова Евгения Дмитриевна – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: evgenia_egorova23@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

Broadband direction finding system based on software-defined radio

E.D. Egorova¹, E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract. The paper aims to consider the possibility of implementing a high-precision direction finding complex for sectoral coverage based on the Pluto+ SDR software-defined radio. The peculiarity of the proposed direction finding complex is the simplicity of implementation, as well as a high degree of repeatability of the components, which is especially important for minimizing the phase error that occurs in the process of measuring the characteristics of electromagnetic waves. To assess the efficiency of the direction finding complex, we carried out measurements of the main characteristics of the complex at different signal levels, as well as errors that can occur when setting up the antenna-feeder path of the direction finder. The purpose of the work is to develop and study the direction finding complex based on software-defined radio; form the antenna-feeder path of the direction finding complex; carry out measurements of the complex under conditions of different signal levels. During the development, we used the Python programming language, carried out antenna modeling in DS CST Studio Suite 2024; we made three-dimensional parts using additive technologies, carried out experimental measurements using a vector network analyzer, a reference generator. The novelty of the proposed design lies in the implementation of a direction finding complex based on a compact SDR receiver Pluto+ with the implementation of the software part in the Python language with the implemented functionality of automatic signal detection, a spectrum analyzer, which increases the efficiency of determining the bearing on the radio source. The proposed design is easy to manufacture, and also provides high repeatability, which is especially important for radio direction finding complexes.

The practical significance of the work lies in the creation of a compact, easy-to-implement radio direction finding complex based on software-defined radio with an antenna complex based on two log-periodic antennas. It is important to note the relevance and importance of implementing small direction finding complexes. In the course of the study, we considered factors that affect the accuracy of determining the bearing of an electromagnetic wave.

Key words: direction finding; software defined radio; broadband direction finder; Adalm Pluto

Acknowledgements. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002).

References

1. The Rohde & Schwarz “An introduction to direction finding methodologies”, White Paper, 2020, 26 p.
2. Purwanto K.N.J., Yahya A., Khamis N.H.H., Nor N.M., Shaari M.R., Sidek A.R.M. “Development of radio direction finder using 6 log periodic dipole array antennas”, *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2018, pp. 157-160.
3. Lee J.-H., Kim J.-K., Ryu H.-K., Park Y.-J. “Multiple array spacings for an interferometer direction finder with high direction-finding accuracy in a wide range of frequencies”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 563-566.
4. Hidayat S. “Calibration of direction finder”, *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 95-97.
5. Bergzen H. “A novel concept for a tactical HF direction finder”, *The Institution of Engineering and Technology 11th International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009)*, 2009, pp. 1-4.
6. Skinner S., Patel K., Pittman J., Lebednik B., Vassallo F., Duncan K.J. “Direction finding system using an N-Channel software defined radio implemented with a phase interferometry algorithm”, *2019 SoutheastCon*, 2019, pp. 1-5.
7. Xiao W., Fan Q., Li X., Xiong Z., Zhang J. “Control strategy of ground target tracking for fixed-wing UAV”, *2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, 2018, pp. 1-4.
8. Anggraeni M.E., Handayani P., Hendratoro G. “Double-directional outdoor MIMO channel measurement at 2.4 GHz using SDR”, *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2016, pp. 255-260.
9. Lazarev V., Fokin G. “Positioning accuracy evaluation of radio emission sources using time difference of arrival and angle of arrival methods”, *Proceedings of Telecommunication Universities (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2019, no. 5(2), pp. 88-100.
10. Pehlivan M., Yeğin K., Aşci Y. “Design of 1–18 GHz parabolic reflector antenna with LPDA feed”, *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2016, pp. 1-3.
11. Limpiti T., Chantaveerod A.Y. “Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz band applications”, *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.

Submitted 08.10.2025; revised 01.12.2025

Information about the authors

Evgeniya D. Egorova, laboratory researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: evgenia_egorova23@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

Метод и алгоритм когнитивно-ресурсного синтеза радиосистемы передачи данных наблюдения с автономных беспилотных летательных аппаратов тактического звена

И.Е. Мухин, И.Г. Бабанин, Е.Ю. Бабанина

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация. Представлен метод и алгоритм синтеза радиосистемы мультителевионного наблюдения с беспилотных летательных аппаратов, отличающийся от известных тем, что за счет предварительной нейрокогнитивной обработки данных, многокритериального синтеза радиоустройств на предполётном этапе выполняются следующие действия: 1) формирование нейрокогнитивного вычислителя из заданного ансамбля предварительно сформированного множества B , эталонной спектральной плотности мощности сигнала, оценка максимальной дальности полета, отношения сигнала-шум на входе приёмного устройства; 2) формирование оценки электронно-вычислительного ресурса нейрокогнитивного вычислителя, работающего на одном из трёх уровней инфологической модели предварительной обработки данных, а также остаточного электронно-вычислительного ресурса под размещение синтезируемой в дальнейшем передающей части радиосистемы; 3) формирование целевой функции многокритериального синтеза устройств, в основу которых положены: частный критерий минимизации электронно-вычислительного ресурса программно-конфигурируемой радиосистемы; частный критерий минимизации пик-фактора формируемого многопозиционного радиосигнала; частный критерий минимизации действия помех, сосредоточенных в узкой полосе частот; частный критерий максимизации помехоустойчивости радиосистемы к аддитивному белому гауссову шуму с учётом внутренних и внешних стабилизирующих факторов; частный критерий минимизации внеполосного излучения и обеспечения заданной скорости передачи данных исходя из особенностей работы нейрокогнитивного вычислителя; 4) формирование множества A из ансамбля совокупности структурно-функциональных элементов приёмной и передающей частей; 5) из предварительно сформированной целевой функции многокритериального синтеза устройств и ансамбля структурно-функциональных элементов радиотракта множества A осуществляется синтез наиболее эффективного радиотракта для выполнения когнитивно сформированной задачи оператором.

Ключевые слова: разведывательная полезная нагрузка; мультителевионное наблюдение; когнитивный запрос оператора; многокритериальный синтез сигнальной конструкции; инфологическая модель

Введение

В соответствии с распоряжением от 21 июня 2023 года №1630-р Правительство Российской Федерации утвердило стратегию развития беспилотной авиации Российской Федерации на период 2030 года и на перспективу до 2035 года. В стратегии отмечена необходимость развития одного из восьми векторов применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – проведение разведки и обеспечение охраны территорий и объектов, которое включает виды работ с применением оптических, радиолокационных, аэромагнитных, тепловизионных, мультиспектральных, измерительных и других средств сбора и передачи данных, дистанционного мониторинга, осуществляемых в целях минимизации угроз безопасности лиц и имущества.

В ходе патентного обследования в базах федерального института промышленной собственности (ФИПС) – <http://www.fips.ru/>; Евра-

зийского патентного ведомства (ЕАПВ) – <http://www.eapo.org/>; Европейской патентной организации (ЕПО) – <http://www.espacenet.com/>; Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС) – <http://www.wipo.int/>; ведомства по патентам и товарным знакам США – <http://patft.uspto.gov/> выявлено:

1) передача данных наблюдения с малогабаритных, малоподвижных, маловысотных (МММ) БПЛА осуществляется в большинстве случаев в потоковом режиме с использованием типовых сигнально-кодовых конструкций (СКК) без возможности адаптации к установленной электромагнитной обстановке (ЭМО) в зоне проведения работ;

2) отсутствует возможность варьирования единым электронно-вычислительным ресурсом между информационной частью предварительной обработки мультителевионных данных и радиокommunikационной частью;

3) во всех гражданских радиосистемах передачи данных наблюдения отсутствует возможность перераспределения интеллектуальной деятельности в представлении «человек-

машина».

С учётом выше описанных недостатков современных средств передачи данных наблюдения с МММ БПЛА, а также развития интегральной микроэлектроники, искусственного интеллекта, подходов к проектированию приёмопередающих устройств целью работы является разработка метода синтеза радиотехнической системы передачи данных мультителевиционного наблюдения с МММ БПЛА тактического звена с учётом адаптации к когнитивному запросу оператора.

Когнитивный запрос оператора – совокупность данных о полётном маршруте, ЭМО в

регионе, типе местности, а также предпочтениях по инфологическому уровню априорной обработки данных наблюдения, каналу связи.

Кроме того, разрабатываемый метод синтеза интеллектуальной радиосистемы должен учитывать модульность физических конструкций для повышения ремонтопригодности, осуществления взаимозаменяемости модулей и возможности выполнения модернизации в будущем. Исходя из выше изложенных требований, наиболее предпочтительной конструкцией системы является модульная, которая показана на рис. 1.



Рис. 1. Наиболее предпочтительная структурно-функциональная схема интеллектуальной радиосистемы передачи мультителевиционных данных наблюдения

Достижение поставленной цели позволит синтезировать интеллектуальную радиотехническую систему передачи данных мультителевиционного наблюдения с МММ автономных БПЛА для следующих видов деятельности:

- 1) оперативного выявления правонарушителей (технических, биологических объектов) в сельскохозяйственных угодьях, лесных, степных массивах, включая заповедные территории;
- 2) выявления разыскиваемых техсредств, людей в рамках проведения оперативно-розыскных работ;

- 3) поиска пропавших людей на обширных территориях в результате ЧС;
- 4) выявления несанкционированных свалок, оценки состояния мусорных площадок;
- 5) выявления пасечных хозяйств близ с/х массивов для апостериорной оценки степени опыления сельскохозяйственных культур;
- 6) оценки состояния некоторых видов животных и путей их миграции.

1. Априорная обработка данных мультителевизионного наблюдения нейрокогнитивным вычислителем БПЛА

В основе априорной обработки мультителевизионных данных нейрокогнитивным вычислителем положен инфологический подход. Данный подход подразумевает обработку на одном из трех уровней: частотно-временном, семантическом или ассоциативно-онтологическом. В соответствии с инфологическим представлением выбранный уровень задействует все ниже лежащие логические уровни. Чем выше уровень предварительной обработки данных, тем больше необходимо задействовать электронно-вычислительных ресурсов единого электронно-вычислительного узла полезной нагрузки (ПН) автономных МММ БПЛА. На частотно-временном уровне работы устройства осуществляется формирование данных с заданными разрешением, кадровой частотой, цветовой моделью, глубиной цвета блоками формирования двумерных массивов. На семантическом уровне обеспечивается обнаружение, распознавание, идентификация наблюдаемых объектов по одному или нескольким каналам видеорегистрации в видимом, инфракрасном (ИК) (опционально), терагерцовом (ТГц) (опционально) диапазонах. В основу работы устройства на данном уровне положены тематические свёрточные нейронные сети. Ассоциативно-онтологический уровень инфологии позволяет сформировать наиболее полное представление об объекте наблюдения. Работа устройства на данном уровне обеспечивается методами сравнения предварительно сформированных онтологий со сформированными ассоциациями (совокупностью семантических признаков) в процессе наблюдения.

Так, нейрокогнитивный вычислитель интеллектуальной радиосистемы мультителеви-

зионного пассивного наблюдения может функционировать в одном из представленных режимов, выбор которых может осуществляться исходя из когнитивного запроса оператора МММ БПЛА тактического звена: передачи потокового видео (режим 1); передачи семантических данных (режим 2); передачи потокового видео и семантических данных (режим 1+2) (рис. 2); передачи ассоциативно-онтологических данных (режим 3); передачи потокового видео и ассоциативно-онтологических данных (режим 1+3); передачи потокового видео и семантических, ассоциативно-онтологических данных (режим 1+2+3).

Работа нейрокогнитивного вычислителя в режимах 2; 3; 1+2; 1+3; 1+2+3 позволяет сформировать данные для вычисления координат наблюдаемого объекта, а работа в режимах 2, 3 существенно снизить объем передаваемых разведанных на наземный пункт контроля и управления (НПКУ) ПН автономных МММ БПЛА.



Рис. 2. Пример предварительно обработанных данных нейрокогнитивным вычислителем МММ БПЛА для последующей передачи в режиме 1+2

Структурно-функциональная схема нейрокогнитивного вычислителя интеллектуальной радиотехнической системы показана на рис. 3.

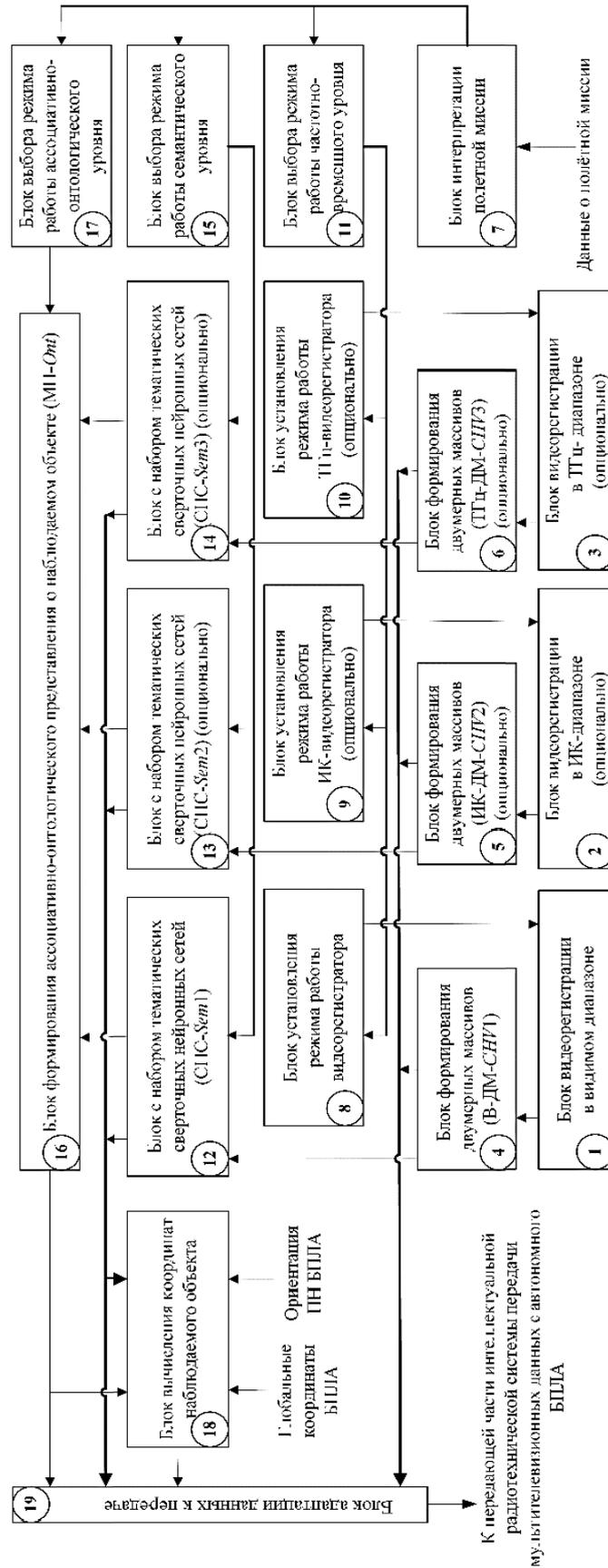


Рис. 3. Структурно-функциональная схема нейрокогнитивного вычислителя априорной обработки мультитеlevisionных данных наблюдения с МММ БПЛА

Устройство работает следующим образом. Когнитивно сформированные данные оператором, а именно предпочтения по априорной обработке данных наблюдения ПН МММ БПЛА, полётный маршрут, поступают в блок 7, где происходит формирование особенностей функционирования частотно-временного, семантического, ассоциативно-онтологического уровня инфологической модели, с последующей передачей в блоки 11, 15, 17 соответственно. В блоке 11 выбирается необходимое оборудование для получения исходных данных с подстилающей поверхности: видеорегистратор в видимом диапазоне, ИК-диапазоне и/или ТГц-диапазоне, а также необходимые параметры регистраторов: разрешение, фокусное расстояние, кадровая частота и т.д. При выборе оборудования и его характеристик также учитывается высота, скорость полёта МММ БПЛА, угол наклона видеорегистрирующих камер. Блоки 8, 9 и 10 отвечают за формирование управляющих воздействий на блоки 1, 2 и 3 соответственно. Блоки 1, 2 и 3 камеры мониторинга в видимом, ИК и ТГц диапазонах. Данные с блоков передаются в блоки 4, 5, 6, которые формируют изображения в соответствующих диапазонах с заданным расширением. В блоке 15 осуществляется выбор необходимых предварительно обученных свёрточных нейронных сетей, построенных по архитектуре YOLOv8. В блоках 12, 13 и 14 хранится набор тематических нейронных сети со следующими размерами моделей: *nano*, *small*, *medium*, *large*, *x*, а также осуществляется семантический анализ изображений, полученных в видимых, ИК и ТГц диапазонах.

В блоке 17 осуществляется выбор необходимых онтологий для последующего анализа и формирование управляющего воздействия на блок 16. В блоке 16 выполняется ассоциативно-онтологическая обработка данных по полученным результатам из блоков 12, 13, 14 на основе теории множеств. Результат обработки данных – формирование прямоугольной области обнаруженного объекта по его ассоциативно-онтологическим признакам.

В зависимости от когнитивного предложения оператора по априорной обработке данные из блоков 12, 13, 14, 16 или их части поступают в блок 18. Блок 18 выполняет расчёт координат объекта наблюдения на основе определения дальности до него по его семантическим или ассоциативно-онтологическим признакам, данных спутниковой радионавигации типа GPS, ГЛОНАСС, ориентации (тангажа, крена, рыс-

канья) ПН МММ БПЛА. Блок 19 адаптирует данные, полученные от блоков 4, 5, 6, 12, 13, 14, 16, 18 или их части, к передающей телекоммуникационной части интеллектуальной радиосистемы.

2. Метод и алгоритм когнитивно-ресурсного синтеза телекоммуникационной части интеллектуальной радиосистемы

Построение нейрокогнитивного вычислителя априорной обработки мультитеlevisionных данных наблюдения позволяет оценить задействованный ER_{neuro} и остаточный электронно-вычислительный ресурс ER_{ost} ПН МММ БПЛА для дальнейшего многокритериального синтеза многопозиционных сигналов как с известными видами манипуляций: ФМн-2, ФМн-4, КАМн-16, КАМн-64, так и с неизвестными видами манипуляций, а также необходимую скорость передачи данных между ПН МММ БПЛА и НПКУ.

Для рационального использования ресурсов радиотракта логично применять комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за электронно-вычислительный ресурс ПН БПЛА, внеполосное излучение и обеспечение заданной скорости передачи данных, помехоустойчивость и обеспечение требуемого качества передаваемых данных, ослабление действия помех с сосредоточенной по спектру энергией [1].

Частный критерий минимизации внеполосного излучения и обеспечения заданной скорости передачи данных. Для минимизации внеполосного излучения и обеспечения необходимой скорости обмена данными целесообразно подобрать соответствующий формирователь сигнального созвездия, битовую скорость R , коэффициент скругления β формирующего фильтра. Показатель качества имеет вид:

$$\min_A \{h(10 \log_{10} [G_a(f) - G_{\log}(f)])\}, \quad (1)$$

где $h(\cdot)$ – штрафная функция на спектр излучаемого сигнала; $G_a(f)$ – спектральная плотность мощности сформированного сигнала из заданного ансамбля совокупности структурно-функциональных элементов множества A ; $G_{\log}(f)$ – спектральная маска на излучаемый сигнал в логарифмическом масштабе.

Частный критерий минимизации электронно-вычислительного ресурса программно-

конфигурируемой радиосистемы (ПКР) ПН МММ БПЛА. Для минимизации электронно-вычислительного ресурса ПКР ПН необходимо выбрать совокупность структурно-функциональных блоков с необходимыми и достаточными параметрами для обеспечения заданного качества передаваемых данных. Например, для цифрового фильтра частотной селекции – это необходимый порядок. Увеличение порядка фильтра приведет к большому расходу электронно-вычислительного ресурса, а уменьшение к большим эквивалентным энергетическим потерям.

$$\max_A \{ER_{ost} - ER_a\}, \quad (2)$$

где ER_{ost} – остаточный электронно-вычислительный ресурс ПКР ПН МММ БПЛА, ER_a – электронно-вычислительный ресурс, задействованный под реализацию совокупности структурно-функциональных элементов из ансамбля множества A .

Частный критерий максимизации помехоустойчивости. С помехоустойчивостью радиотракта напрямую связана достоверность принимаемых данных BER (bit error rate, вероятность ошибки на бит). По умолчанию $BER=10^{-5}$. В соответствии со статистическими моделями Окамура-Хата, COST231 при расчёте предельного отношения сигнал-шум $(E_b/N_0)_{lim}$ на входе ПКР НПКУ учитывается максимально допустимый уход МММ БПЛА от НПКУ R_u , тип местности.

$$\max_A \left\{ \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{lim} - \left(\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_a - \Delta_{a_{пот}} \right) \right\},$$

при $BER = const$ (3)

где $(E_b/N_0)_a$ – потенциальная помехоустойчивость радиотракта, определяемая совокупностью идеализированных структурно-функциональных элементов из ансамбля множества A , $\Delta_{a_{пот}} = \Delta_{пер} + \Delta_{пр}$ – энергетические потери шумовой и нешумовой природы в радиотракте передающего ($\Delta_{пер}$) и приёмного ($\Delta_{пр}$) устройств.

Исходя из архитектуры построения современных средств связи с МММ БПЛА внутренними источниками энергетических потерь шумового и нешумового характера являются [2, 4]:

$$\begin{aligned} \Delta_{пер} + \Delta_{пр} = & K_{апр} + \Delta_{фидер} [K_{шфидер}(f)] + \\ & + \Delta_{дк} [K_{шдк}(f)] + \Delta_{мшу} [K_{шмшу}(f)] + \sum_{i=1}^I \Delta_{фчс}^i (\delta_{ачх}^i) + \\ & + \sum_{m=1}^M \Delta_{фчс}^m (\delta_{фчх}^m) + \sum_{p=1}^P \Delta_{см}^p [K_{шсм}^p(f)] + \sum_{j=1}^J \Delta_{гет}^j [G_v^j] + (4) \\ & + \sum_{d=1}^D \Delta_{упч}^d [K_{шупч}^d(f)] + \Delta_{свнч} (\delta_f) + \Delta_{свтч} (\delta_0) + \\ & + \Delta_{увс} (\delta_u) + \Delta_{рас} (\delta_a) + \Delta_{омсн} (\delta_{мсн}) + \\ & + \Delta_{ашп} (N_{разр}) + \Delta_{ум} (K_{нел}), \end{aligned}$$

где $K_{апр}$ – коэффициент шума приёмной и передающей антенн, $\Delta_{фидер} [K_{шфидер}(f)]$ – энергетические потери в фидерных линиях, $\Delta_{дк} [K_{шдк}(f)]$ – энергетические потери в дуплексере/комбайнере, $\Delta_{мшу} [K_{шмшу}(f)]$ – энергетические потери в малошумящем усилителе (МШУ), обусловленные тепловыми шумами с $K_{шмшу}(f)$, $\Delta_{фчс}^i (\delta_{ачх}^i)$ – эквивалентные энергетические потери в i -ом фильтре частотной селекции, вызванные неравномерностью его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $\delta_{ачх}$, $\Delta_{фчс}^m (\delta_{фчх}^m)$ – эквивалентные энергетические потери в m -ом фильтре частотной селекции, вызванные нелинейностью его фазочастотной характеристики (ФЧХ) $\delta_{фчх}$, $\Delta_{см}^p [K_{шсм}^p(f)]$ – энергетические потери в p -ом смесителе, обусловленные тепловыми шумами с $K_{шсм}^p(f)$, $\Delta_{гет}^j [G_v^j]$ – энергетические потери, обусловленные неидеальностью амплитудно-фазового спектра генерации j -го гетеродина (количественной характеристикой степени приближения генерации гетеродина к идеальной является спектральная плотность мощности фазовых шумов), $\Delta_{упч}^d [K_{шупч}^d(f)]$ – энергетические потери d -го усилителя промежуточной частоты с коэффициентом шума $K_{шупч}(f)$, $\Delta_{свнч} (\delta_f)$ – эквивалентные энергетические потери системы восстановления несущей частоты, обусловленные погрешностью восстановления несущей δ_f , $\Delta_{свтч} (\delta_0)$ – эквивалентные энергетические потери системы восстановления тактовой частоты, обусловленные погрешностью восстановления тактовой частоты демодулятора δ_0 , $\Delta_{увс} (\delta_u)$ – эквивалентные энергетические потери, погрешностью поддержания уровня сигнала δ_u на входе демодулятора, $\Delta_{рас} (\delta_a)$ – эквивалентные энергетические потери, вызванные рассогласованием частотных характеристик δ_a формирующего и комплексно-сопряженного с ним согласованного фильтров,

$\Delta_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}})$ – эквивалентные энергетические потери из-за остаточной межсимвольной интерференции $\delta_{\text{мси}}$, $\Delta_{\text{ум}}(K_{\text{нел}})$ – эквивалентные энергетические потери в усилителе мощности из-за нелинейных искажений $K_{\text{нел}}$, $\Delta_{\text{ацп}}(N_{\text{разр}})$ – энергетические потери в АЦП заданной разрядностью, вызванные ошибками квантования.

Дестабилизирующие факторы можно классифицировать как вариативные и неизменные. Неизменные потери – это потери, которые невозможно компенсировать методами цифровой обработки. Вариативные потери – потери значения которых можно изменить за счет воздействия больших электронно-вычислительных ресурсов. Структурно-функциональные элементы, реализованные программным способом с вариативными потерями, составляют разнообразие ансамбля множества A .

К основным источникам варьируемых потерь можно отнести:

– в передающем тракте интеллектуальной радиосистемы:

1) неравномерность АЧХ формирующего фильтра, вызванная ограничением импульсной характеристики;

– в приёмном тракте интеллектуальной радиосистемы:

1) рассогласование АЧХ формирующего и согласованного фильтров;

2) погрешность восстановления тактовой частоты демодулятора;

3) погрешностью восстановления несущей частоты демодулятора;

4) неидеальность параметров АЧХ, ФЧХ цифровых фильтров частотной селекции.

Частный критерий минимизации пик-фактора формируемого сигнала. Для увеличения коэффициента полезного действия большинство современных усилителей мощности радиопередатчиков работают в нелинейном режиме. Как известно, в данном режиме использование сигналов с флуктуациями огибающей, таких как КАМн, ФМн, OFDM, энергетически неэффективно. Следовательно, задача минимизации пик-фактора Π , как показателя энергоэффективности, крайне необходима и выполняется:

$$\min_A \left\{ \frac{D(P_a)}{(m(P_a))^2} \right\}, \quad (5)$$

где $D(P_a)$, $m(P_a)$ – дисперсия и математическое ожидание сформированной сигнально-кодовой конструкции из заданного ансамбля совокупности структурно-функциональных элементов множества A .

Для минимизации пик-фактора выбираются, как правило, формователи сигнальных конструкций с меньшей позиционностью, неравномерностью сигнального созвездия χ .

Частный критерий минимизации действия помех со сосредоточенной по спектру энергией [3]. Для отстройки от действующих помех целесообразно спектральную плотность мощность синтезируемого сигнала G_s структурно-функциональными элементами из множества A устремить к эталонной спектральной плотности мощности сигнала G_{opt} в пределах полосы частот $[F_1, F_2]$:

$$\min_{\Theta \in A} \{d_2(G_{opt}, G_s)\}, \quad (6)$$

где $d_2(\cdot)$ – расстояние в евклидовой метрике, Θ – подмножество элементов множества A , в пределах которого происходит вычисление наиболее эффективной структуры приёмника и передатчика. Выражение определяет максимизацию пропускной способности радиоканала передачи данных в условиях действия помех.

Целевая функция выбора наиболее эффективной структуры ПКР беспилотного авиационного комплекса тактического звена определяется как:

$$k_p(A) = k_1 M_1 h(10 \log_{10}[G_a(f) - G_{\log}(f)]) + k_2 M_2 \frac{1}{ER_{ost} - ER_a} + k_3 M_3 \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{lim}} - \left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_a - \Delta_{a_{\text{нор}}}\right)} + k_4 M_4 \frac{D(P_a)}{(m(P_a))^2} + k_5 M_5 d_2(G_{opt}, G_s), \quad (7)$$

где $k_1 - k_5$ – коэффициенты, задающие вес критериев, $M_1 - M_2$ – нормирующие коэффициенты.

На рис. 4 приведена блок-схема алгоритма когнитивно-ресурсного синтеза интеллектуальной радиотехнической системы мультителеви-зионного наблюдения с МММ БПЛА.

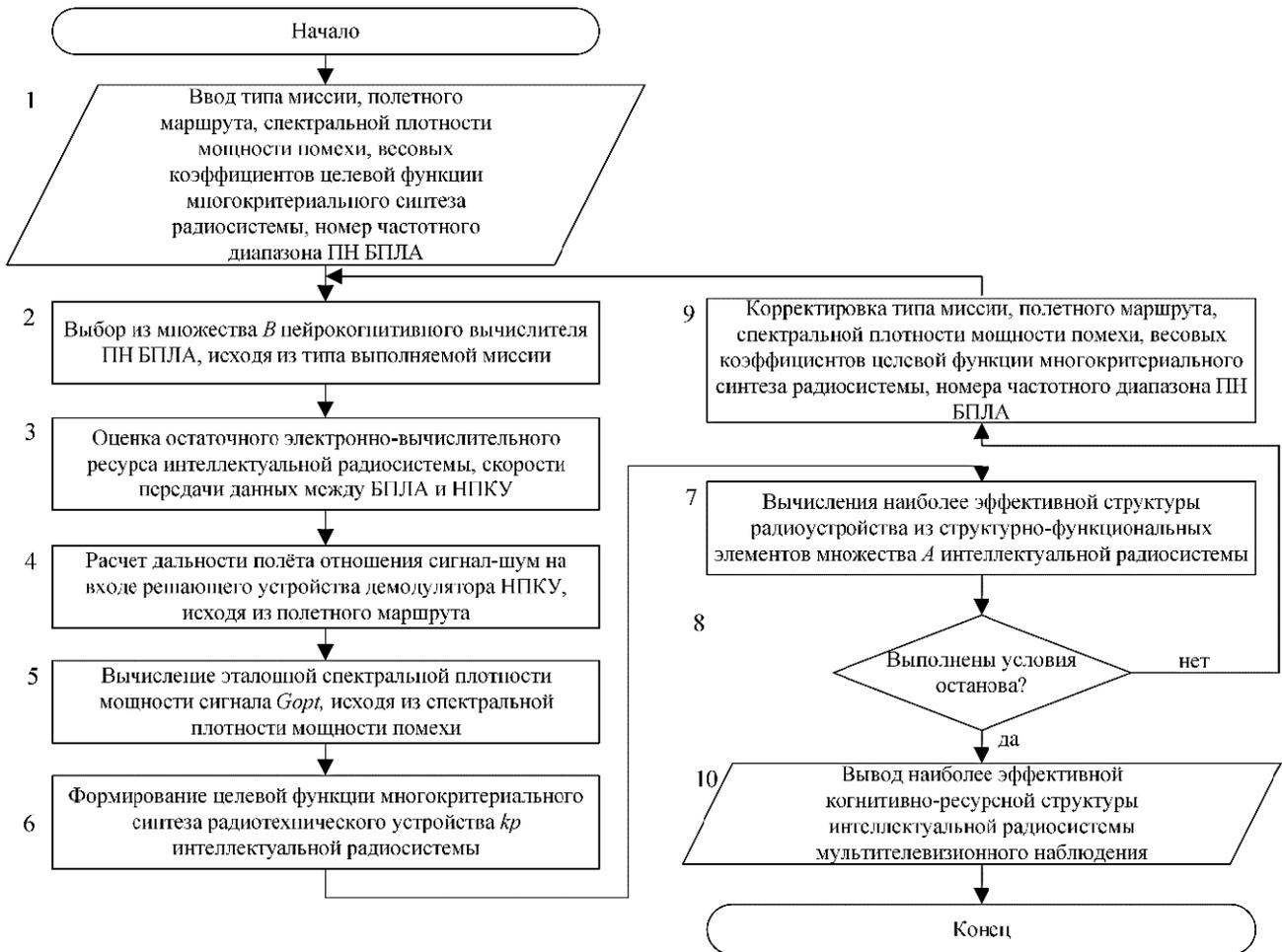


Рис. 4. Блок-схема алгоритма когнитивно-ресурсного синтеза интеллектуальной радиотехнической системы мультителевионного наблюдения с МММ БПЛА

Предложенный способ адаптации радиосистемы к когнитивно сформированному запросу оператора заключается в следующем. В блоке 1 на предполетном этапе происходит ввод когнитивно сформированного запроса оператора, в части типа миссии, полетного маршрута, весовых коэффициентов множителей многокритериального синтеза радиосистемы, спектральной плотности мощности помехи, номера частотного канала работы ПН МММ БПЛА. Далее в блоке 2 происходит выбор нейрокогнитивного вычислителя из множества B для выполнения поставленной миссии. Данный блок в последующем задает битовую информационную скорость R между авиационным аппаратом и НПКУ, остаточный электронно-вычислительный ресурс ER_{ost} для передающего устройства ПКР ПН МММ БПЛА. В блоке 3 осуществляется задание параметров битовой скорости R , остаточного электронно-вычислительного ресурса:

$$ER_{ost} = ER_{system} - ER_{neuro}, \quad (8)$$

где ER_{system} – электронно-вычислительный ресурс радиосистемы; ER_{neuro} – электронно-вычислительный ресурс нейрокогнитивного вычислителя.

В блоке 4 производится оценка максимальной дальности расположения авиационного устройства от НПКУ, исходя из полетного маршрута, а также отношение сигнал-шум на входе приёмного устройства с учётом типа местности, эквивалентной изотропно излучаемой мощности. В блоке 5 производится вычисление эталонной спектральной плотности сигнала G_{opt} для дальнейшего уменьшения влияния узкополосной помехи на сигнально-кодую конструкцию в радиоканале путем выбора типа кодирования для прямого расширения спектра. В блоке 6 формируется целевая функция выбора наиболее эффективной структуры ПКР с учётом обоснованного выбора весовых коэффициентов множителей критериев синтеза. В блоке 7 вычисляется наиболее эффективная структура приёмно-передающего устройства путем выбо-

ра совокупности структурно-функциональных элементов с заданными параметрами из множества A для осуществления радиообмена. В блоке 8 производится проверка критериев синтеза радиосистемы на предмет их нахождения в предельно допустимых диапазонах:

- 1) $ER_a < ER_{ost}$;
- 2) $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{lim} > \left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_a - \Delta_{a_пот}\right)$;
- 3) $\frac{D(P_a)}{(m(P_a))^2} < const$;
- 4) $d_2(G_{opt}, G_s) > const$;
- 5) $h(10\log_{10}[G_a(f) - G_{log}(f)]) < 0$.

В случае невыполнения одного или нескольких условий требуется коррекция входных данных. В блоке 9 осуществляется корректировка входных данных – типа миссии, полётного маршрута, спектральной плотности мощ-

ности шума, весовых коэффициентов множителей целевой функции многокритериального синтеза приёмопередатчика, номера частотного канала ПН МММ БПЛА. В блоке 10 выводится когнитивно-ресурсная структура интеллектуальной радиосистемы.

Реализация когнитивно-ресурсного синтеза коммуникационной части интеллектуальной радиосистемы мультитеlevisionного наблюдения, как отмечалось выше, возможно на базе технологий программно-конфигурируемого радио. Структурно-функциональные схемы передающей части радиотехнического устройства ПН БПЛА, приёмной части радиотехнического устройства НПКУ показаны на рис. 5, 6.

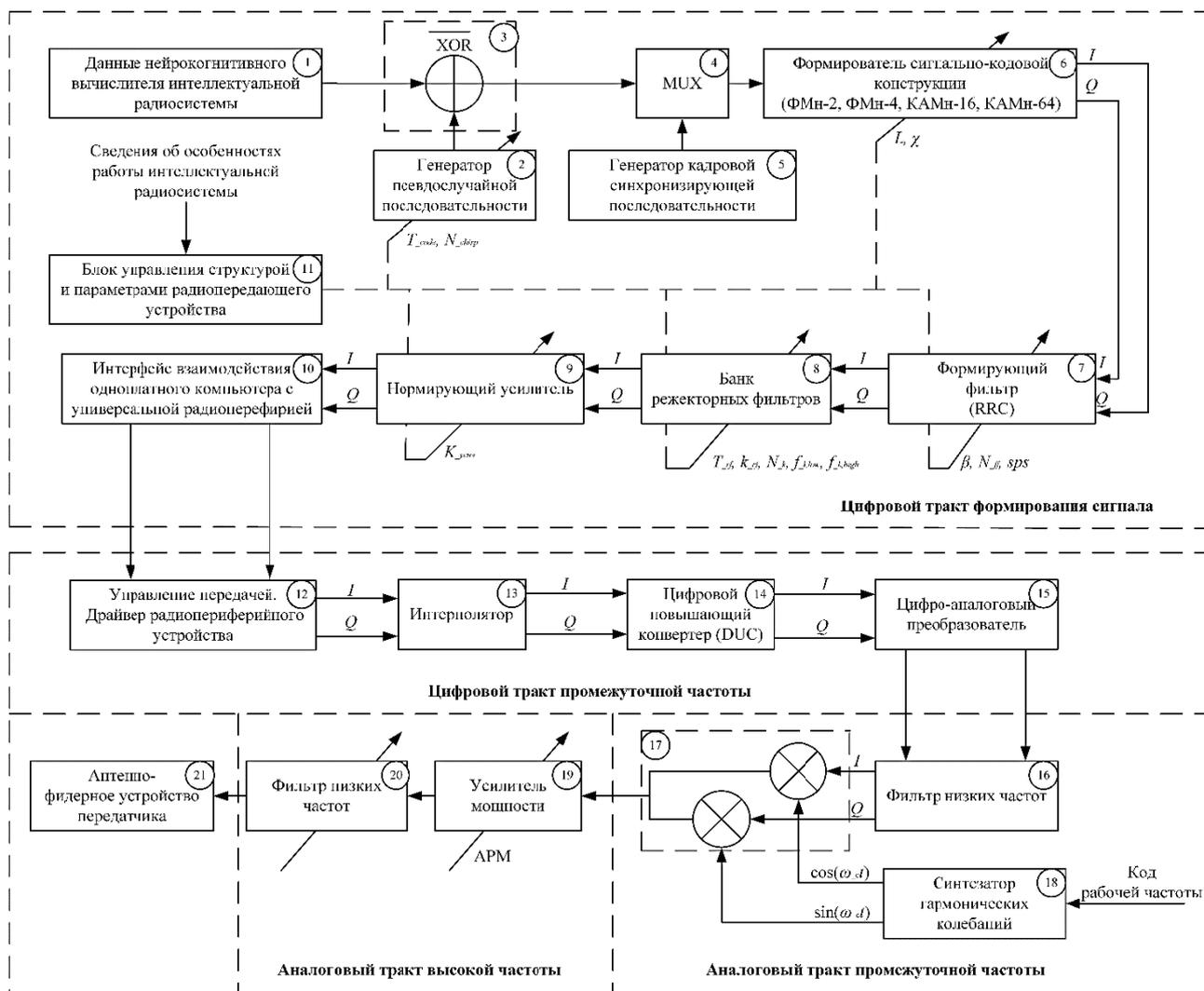


Рис. 5. Структурно-функциональная схема передающей части интеллектуального радиотехнического устройства ПН БПЛА

Множество A задается многообразием параметров структурных блоков, таких как: 1) в передающей части тракта: 2, 6, 7, 8, 9; 2) в при-

ёмной части тракта: 4, 10, 11, 14, 16, 17, 19, 23, 24.

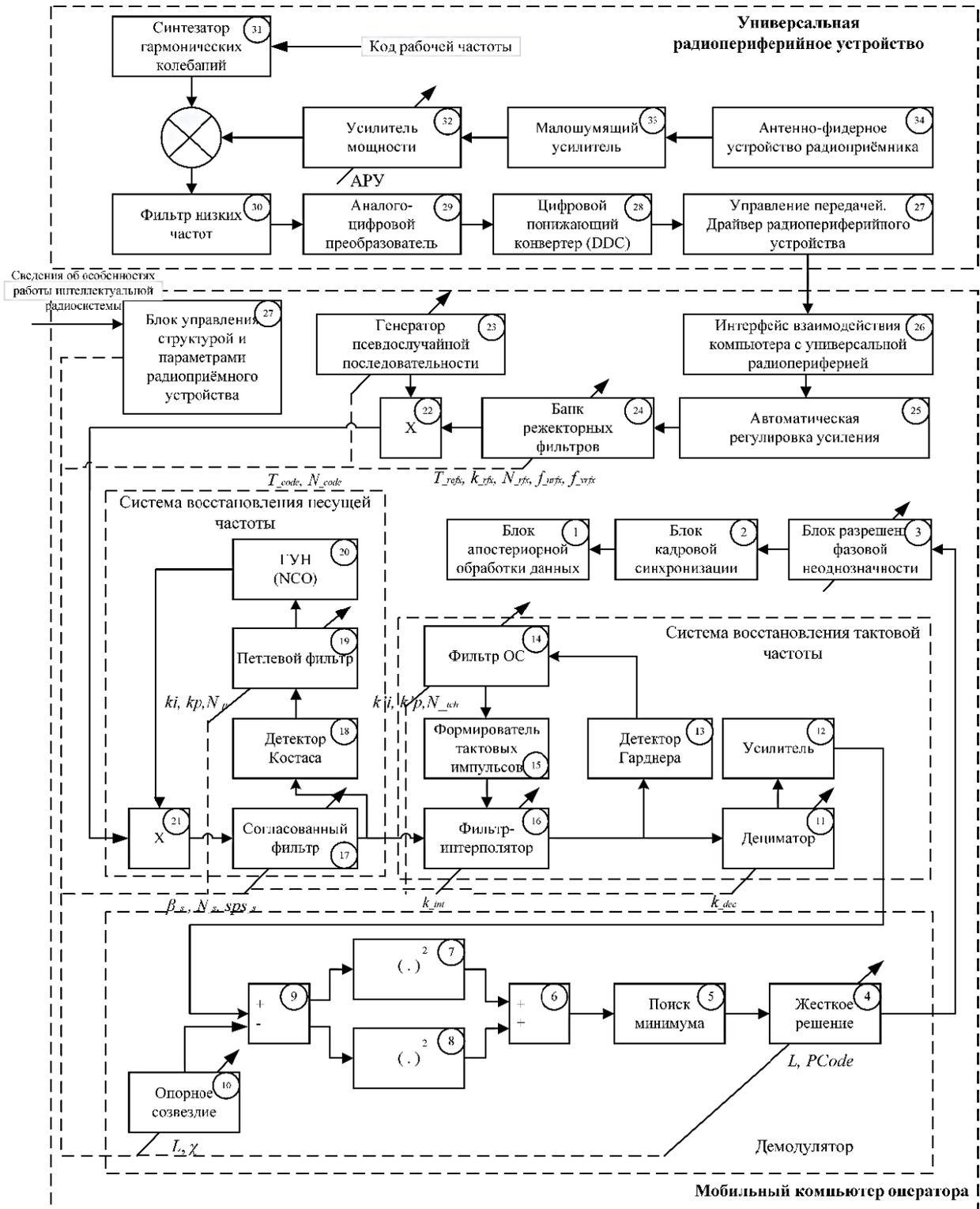


Рис. 6. Структурно-функциональная схема приёмной части интеллектуального радиотехнического устройства НПКУ

3. Макетирование интеллектуальной радиосистемы передачи мультителевизионных данных наблюдения с автономных БПЛА

Интеллектуальная радиотехническая система передачи данных наблюдения с МММ БПЛА включает: аппаратно-программный комплекс НПКУ ПН МММ БПЛА тактического звена; интеллектуальные радиотехнические устройства ПН МММ БПЛА симплексной передачи мультителевизионных данных наблюдения.

Аппаратная реализация макета НПКУ ПН автономных МММ БПЛА включает: нетбук типа Asus Eee PC 1015P Seashell; универсальное радиопериферийное устройство типа Ettus Research USRP B210; радиоприёмное устройство глобальной спутниковой навигационной системы типа Garmin GPSMap 62 (рис. 7).

Программная часть включает ОС Ubuntu 25.04, а также такую среду, как GnuRadio и др.

Макет интеллектуального радиотехнического устройства ПН мультителевизионного наблюдения МММ БПЛА в себя включает единый электронно-вычислительный узел на базе одноплатного компьютера Orange Pi 5, измерительную часть бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в составе модулей GY-521, GY-273, GY-68, NEO-M8N, универсальную радиопериферию USRP B210 видеорегирующие устройства в видимом диапазоне GH13855, ИК-диапазоне MLX90640 (опционально) (рис. 8).



Рис. 7. Макет аппаратно-программного комплекса наземного пункта контроля и управления разведывательными ПН МММ БПЛА тактического звена

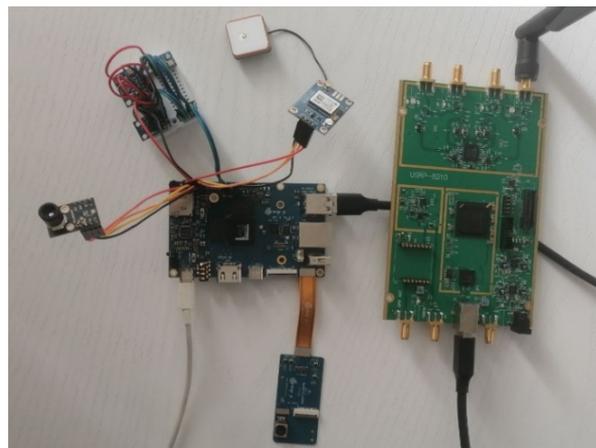


Рис. 8. Макет интеллектуального радиотехнического устройства ПН МММ БПЛА симплексной передачи мультителевизионных данных наблюдения

Внешний вид измерительного узла БИНС ПН МММ БПЛА показан на рис. 9. GY-521 – модуль с трехосевым гироскопом для измерения линейных ускорений, трехосевым акселерометром для измерения угловых скоростей и термометром на базе микросхемы MPU6050. Модуль GY-273 – трехосевой компас-магнитометр на базе микросхемы HMC5883L. Модуль GY-68 – это термометр, барометр на базе микросхемы BMP180. Данный модуль используется, как высотомер. Модуль NEO-M8N – радиоприёмник глобальной навигационной спутниковой связи (ГНСС), поддерживающий платформы GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou. Обмен данными между одноплатным компьютером типа Orange Pi 5 и измерительными модулями GY-521, GY-273, GY-68 осуществляется по последовательному интерфейсу I2C, а с модулем NEO-M8N по интерфейсу UART.

В качестве программной части используются ОС DragonOS Pi64 beta37, а также среды и библиотеки GnuRadio, Ultralytics и др.

Идентификация макета ПН МММ БПЛА осуществляется передачей 48-битного MAC-адреса сетевого контроллера одноплатного компьютера.

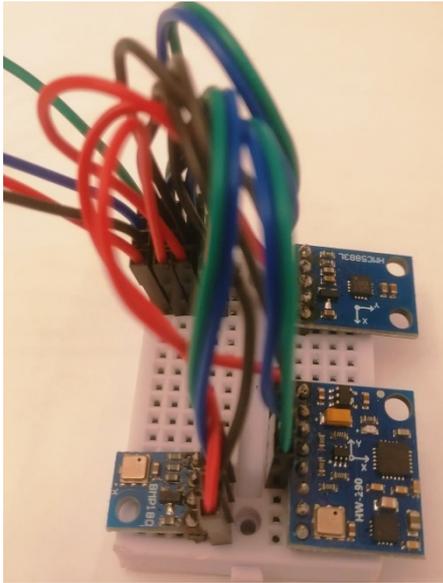


Рис. 9. Макет измерительного узла БИНС (без ГНСС) интеллектуального радиотехнического устройства ПН МММ БПЛА

Макет радиотехнического устройства ПН мультителевиционного наблюдения МММ БПЛА в выше изложенном исполнении (без корпуса, системы охлаждения, блока питания) имеет следующие показатели: масса ≈ 294 г., что ограничивает его размещение среди представленной номенклатуры летательных аппаратов на рынке. Наиболее предпочтительно использование ПН на летательных аппаратах мультироторного типа класса 330 мм.

Заключение

Предложенный метод и алгоритм когнитивно-ресурсного синтеза радиосистемы передачи мультителевиционных данных наблюдения с автономных МММ БПЛА, в отличие от таких технических решений, как Airmoby Sprintlink 10 Вт (Китай), IWave FIP-2405 (Китай), LinkAV LKAV3622 (Китай), ГК «Геоскан»

3D Link (Россия), Airmoby Swiftlink P37 (Китай), ООО «НПП «Автономные аэрокосмические системы – ГеоСервис» РМ 12/14 (Россия), ООО «НПО «Ижевские беспилотные системы» Гранат-4-Э, Скат-350М (Россия), позволяет априорно обрабатывать данные в соответствии с инфологическим подходом, тем самым снижать объем передаваемых данных на НПКУ, что в свою очередь позволяет использовать более помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции в ограниченном диапазоне частот с наличием узкополосных помех. Кроме того, априорная обработка данных осуществляет снижение интеллектуальной нагрузки на оператора тактического звена в процессе выполнения поставленного задания.

Литература

1. Лисничук А.А. Методы и процедуры многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов для адаптивных к помехам систем передачи информации: специальность 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук: Рязань, 2022. 35 с.
2. Мухин И.Е., Хмелевская А.В., Бабанин И.Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. 316 с.
3. Лисничук А.А. Адаптивная к помехам радиосистема передачи информации на основе многокритериального синтеза многопозиционных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 38-43.
4. Метод определения влияния дестабилизирующих факторов на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств / И.Г. Бабанин [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14. № 3. С. 63-87.

Поступила 11.11.2025; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Мухин Иван Ефимович – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Бабанин Иван Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: fiztech-school@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Бабанина Екатерина Юрьевна – аспирант кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Method and algorithm for cognitive-resource synthesis of a radio system for transmitting observation data from autonomous tactical-level unmanned aerial vehicles

I.E. Mukhin, I.G. Babanin, E.Yu. Babanina

South-West State University, Kursk, Russia

Abstract. The article presents a method and algorithm for adapting a multitelevision surveillance radio system from unmanned aerial vehicles, which differs from the known methods in that the following actions are performed at the pre-flight stage due to the preliminary neurocognitive processing of data and the multi-criteria synthesis of radio devices: 1) formation of a neurocognitive computer from a given ensemble of a pre-formed set B , the reference spectral density of the signal power, estimation of the maximum flight range, and the signal-to-noise ratio at the input of the receiver device; 2) formation of an estimate of the electronic and computational resources of the neurocognitive computer operating at one of the three levels of the infological model of data pre-processing, as well as the residual electronic and computational resources for the subsequent synthesis of the transmitting part of the radio system; 3) formation of the target function of multi-criteria synthesis of devices based on: a particular criterion for minimizing the electronic computing resource of a software-configurable radio system; a particular criterion for minimizing the peak factor of a multi-position radio signal; a particular criterion for minimizing interference concentrated in a narrow frequency band; a particular criterion for maximizing the noise immunity of a radio system to additive white Gaussian noise, taking into account internal and external destabilizing factors; a particular criterion for minimizing out-of-band radiation and ensuring a given data transfer rate based on the characteristics of the neurocognitive computer; 4) the formation of a set A from an ensemble of a set of structural and functional elements of the receiving and transmitting parts; 5) from the pre-formed target function of the multi-criteria synthesis of devices and the ensemble of structural and functional elements of the radio path of set A , the most effective radio path is synthesized to perform the operator's cognitively formed task.

Key words: intelligence payload; multitelevision surveillance; operator cognitive request; multi-criteria synthesis of signal design; infological model

References

1. Lisnichuk A.A. "Methods and procedures for multicriteria synthesis of multiposition radio signals for interference-adaptive information transmission systems" ("Metody i protsedury mnogokriterial'nogo sinteza mnogopozitsionnykh radiosignalov dlya adaptivnykh k pomekham sistem peredachi informatsii"), abstract for the degree of Dr. of Technical Sci., Ryazan, 2022, 35 p.
2. Mukhin I.E., Khmelevskaya A.V., Babanin I.G. "Methodological foundations for the synthesis of systems for providing electromagnetic access by means of radio monitoring of modern telecommunication systems" ("Metodologicheskie osnovy sinteza sistem obespecheniya elektromagnitnogo dostupa sredstvami radiomonitoringa sovremennykh sistem telekommunikatsiy"), monograph, Kursk: Publishing house of South-West state university, 2016, 316 p.
3. Lisnichuk A.A. "Interference-adaptive radio information transmission system based on multi-criteria synthesis of multiposition signals", *Digital Signal Processing (Tsifrovaya obrabotka signalov)*, 2023, no. 2, pp. 38-43.
4. Babanin I.G. et al. "Method for determining the influence of destabilizing factors on the multi-criteria synthesis of radio communication equipment of aviation robotic devices", *Bulletin of South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 63-87.

Submitted 11.11.2025; revised 01.02.2026

Information about the authors

Ivan E. Mukhin, Dr. Sci. (Technical), Senior Researcher, Professor, South-West State University (94 50 Let Oktyabrya St., Kursk 305040, Russia), e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan G. Babanin, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, South-West State University (94 50 Let Oktyabrya St., Kursk 305040, Russia), e-mail: fiztech-school@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Ekaterina Yu. Babanina, postgraduate student, South-West State University (94 50 Let Oktyabrya Street, Kursk 305040, Russia), e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Обнаружение слабых узкополосных сигналов на основе контроля интенсивности потока превышений порога спектральными отсчетамиД.А. Моисеев¹, А.Б. Токарев^{1,2}¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²АО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Эффективная работа большинства систем передачи информации предполагает обеспечение на приёмной стороне довольно больших, определяемых требованиями стандартов, отношений сигнал-шум (ОСШ). В отличие от подобных систем комплексы радиоконтроля (КРК) вынуждены анализировать радиообстановку при разнообразных, в том числе и низких ОСШ. И хотя при неблагоприятных условиях рассчитывать на последующий качественный анализ сигналов проблематично, представляется необходимым обеспечить при низких ОСШ хотя бы высокую чувствительность КРК к появлению радиоизлучений в анализируемом диапазоне частот при параллельном требовании минимизации аппаратно-временных затрат на выявление сигналов. Объектом обнаружения будут выступать слабые узкополосные радиоизлучения, имеющие шумоподобный характер. При стабильной интенсивности подобных сигналов в точке приёма для их обнаружения можно рекомендовать к использованию решающую статистику, базирующуюся на разбиении контролируемого радиодиапазона на узкие полосы частот и сравнении с порогом наблюдаемой в этой полосе средней мощности излучения. Однако в условиях замираний эффективность такого подхода снижается, а отсутствие у КРК информации о детальной структуре сигналов заметно осложняет поиск оптимального способа обнаружения. Рассматриваются поиск квазиоптимального алгоритма обнаружения в широкой полосе частот шумоподобных узкополосных сигналов и исследование влияния параметров обработки на качественные показатели алгоритма. Практическая значимость состоит в разработке алгоритма обнаружения слабых узкополосных сигналов, базирующегося на контроле интенсивности потока превышений порога спектральными отсчетами, математического аппарата для исследования его показателей качества, базирующегося на методах анализа марковских цепей, а также в базовой оптимизации параметров обработки, обеспечивающей квазиоптимальность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: радиоконтроль; слабые узкополосные радиосигналы; марковские цепи; оптимизация параметров обнаружения

Введение

Анализ радиообстановки в широких полосах частот, как правило, предполагает преобразование выборок регистрируемых широкополосных случайных процессов (СП) в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с последующим выявлением всплесков в спектрограммах [1]. При этом для повышения чувствительности обнаружителя размерность преобразования Фурье желательно увеличивать, а для снижения вычислительной сложности – уменьшать. Указанное противоречие приводит к тому, что при анализе широких частотных диапазонов размерность N преобразования Фурье нередко выбирают как минимальную по величине среди тех, что позволяют отдельно фиксировать появление сигналов в узкополосных радиоканалах. В соответствии с этим, в последующей части работы предполагается, что появление в диапазоне частот целевых узкополосных радиоизлучений проявляется в спектрограммах повышением среднего уровня одного отдельного отсчета (бина), соответст-

вующего частоте активизировавшегося радиоизлучения. Если номер n подобного спектрального бина будет заранее известен, то обнаружение узкополосного сигнала будет сводиться к обработке последовательности отсчетов спектра с этим номером для рассчитываемых друг за другом по времени спектрограмм.

При отсутствии сведений о структуре обнаруживаемых радиоизлучений использовать информацию о фазах отсчетов спектра проблематично, поэтому далее будем полагать, что исходными данными при обнаружении выступают отсчеты энергетического спектра принимаемого широкополосного случайного процесса

$$X_r(n) = \left| \dot{c}_{(r)}(n) \right|^2, \quad (1)$$

где n – номер спектрального отсчета, r – порядковый номер очередной выборки случайного процесса $u_{ex}(t)$,

$$\dot{c}_{(r)}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_{ex}(kT + rT_u) w(k) e^{-j \cdot 2\pi \cdot \frac{nk}{N}}, \quad (2)$$

– результат БПФ подобной выборки, взвешенной окном $w(k)$, T_u – длительность цикла, разделяющего смежные по времени выборки, N –

длина выборки в отсчетах, T – интервал дискретизации.

Представленный формулами (1)-(2) подход к формированию исходных данных характерен для КРК, анализирующих радиообстановку в широких полосах частот, и называется панорамным режимом сбора данных [2]. В таком режиме ось частот делится на набор смежных поддиапазонов, и радиоприёмник последовательно перестраивается с частоты на частоту, формируя локальные спектральные оценки, которые затем объединяются в единую spectroграмму, характеризующую весь диапазон частот. Последовательность подобных объединенных spectroграмм, получаемых циклично с интервалом $T_{\text{ц}}$, характеризует изменение радиообстановки вдоль оси времени. При этом ближайшие по времени spectroграммы формируются из существенно разнесенных по времени выборок, а потому значения отсчетов спектра с одинаковым номером n (т.е. соответствующие одной и той же частоте) даже в смежных spectroграммах статистически независимы. Что же касается потенциальной статистической зависимости отсчетов спектра на смежных частотах (неизбежной при использовании взвешивания выборок во временной области), то учитывать её в настоящей работе не требуется, т.к. предполагается, что для узкополосных радиосигналов любая решающая статистика будет базироваться на совокупности значений $X_r(n)$, $X_{r+1}(n)$... $X_{r+R_w-1}(n)$, приходящихся на единственный проверяемый бин с номером n . Рекомендуемое количество R_w значений $X_r(n)$, задействуемых для формирования решающей статистики, будет определяться соотношением интервала $T_{\text{ц}}$ формирования spectroграмм и ожидаемой продолжительности выхода в эфир подлежащих обнаружению радиосигналов.

Узкополосные радиоизлучения, как правило, характеризуются длительным пребыванием в эфире, что позволяет выбирать $R_w \gg 1$, однако излишне большие значения R_w на практике могут осложнять оценивание временных границ излучения сигналов. В настоящей работе будем для определённости полагать, что априорные сведения о сигналах и темпе формирования spectroграмм позволяют рекомендовать формировать решающие статистики на основе $R_w = 16$ spectroграмм. Влияние параметра R_w на оптимизацию алгоритмов обработки будет предметом последующих исследований.

Энергетическое обнаружение узкополосных сигналов, его достоинства и недостатки

Если бы потенциальная частота (номер бина n), продолжительность и временные границы выхода сигнала в эфир были известны, то для энергетического обнаружения можно было бы рекомендовать решающую статистику вида [3]

$$X_R(n) = \frac{1}{R} \cdot \sum_{r=1}^R \left| \dot{c}_{(r)}(n) \right|^2, \quad (3)$$

т.е. усредненный по R spectroграммам энергетический спектр, при условии, что выборки с номерами $r = \overline{1, R}$ приходятся на временной участок существования сигнала. Для радиоконтроля подобная ситуация нехарактерна; как правило, может быть задана лишь минимально возможная длительность целевого сигнала, а его частота и время появления, как правило, неизвестны. Соответственно, практическая задача обнаружения предполагает проверку огромного количества гипотез. При этом попытка перебора гипотез о правильной длительности сигнала может дополнительно заметно усложнить обработку, поэтому если минимальная ожидаемая продолжительность сигнала достаточно велика, то обычно ограничиваются формированием и оценкой величин $X_R(n)$ лишь для подобной минимальной длительности. С учетом сделанных выше допущений будем полагать $R = R_w$.

Для оценки статистических свойств алгоритма энергетического обнаружения рассмотрим характеристики величин $X_R(n)$. Если считать фоновый шум нормальным белым, а бин n приходящимся на шумовой участок оси частот, то в соответствии с [3], отчеты усредненного спектра $X_R(n)$ будут подчиняться центральному χ^2 – распределению

$$W_{\chi^2}(x) = \frac{1}{\lambda \Gamma(R)} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{R-1} e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad x \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{где} \quad \lambda = \lambda_{\text{ш}} = \sigma_{\xi 1}^2 / R, \quad (5)$$

а $\sigma_{\xi 1}^2$ – мощность шума, приходящаяся на каждый отсчет дискретного спектра.

При классическом энергетическом обнаружении решение в пользу гипотезы H_1 о наличии сигнала принимается при выполнении условия

$$X_R(n) \geq x_{\text{thr } R}, \quad (6)$$

где $x_{\text{thr } R}$ – порог обнаружения по усредненному спектру. Соответственно, для фиксированной совокупности spectroграмм и фиксированного

номера бита n вероятность ложного обнаружения будет определяться центральным χ^2 – распределением, для которого порог $x_{thr R}$, соответствующий условию $P\{\chi^2 \geq x_{thr R}\} = \varepsilon$, определяется соотношением [3]

$$x_{thr R} = \sigma_{\varepsilon 1}^2 \cdot t_{\varepsilon}^3, \quad (7)$$

где $\sigma_{\varepsilon 1}^2$ – мощность шума, приходящаяся на каждый отсчет спектра,

$$t_{\varepsilon} = 1 - \frac{1}{9R} + x_{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{9R}}, \quad (8)$$

– коэффициент, определяемый числом усредняемых периодограмм R и величиной x_{ε} , соответствующей ε процентной точке гауссовского распределения.

При выборе требований к параметру ε следует принять во внимание, что при анализе широких полос частот вероятность хотя бы однократного ложного обнаружения в полосе растет, в первом приближении, пропорционально ширине спектрограммы. Соответственно, в расчете на полосу шириной $N = 1000$ отсчетов из практического условия $P_{ло1}(N=1000) \leq 0,1$ получаем требование

$$\varepsilon \leq 10^{-4}. \quad (9)$$

Рассмотрим теперь бин n , соответствующий шумоподобному сигналу, характеризующему отношению сигнал-шум (ОСШ) равному h^2 . χ^2 – распределение, соответствующее сигнальным отсчетам спектра $X_R(n)$ будет характеризоваться параметром

$$\lambda = \lambda_c = \lambda_{ш} (1 + h^2). \quad (10)$$

Показатели обнаружения для подобного часто применяемого на практике алгоритма при стабильной интенсивности обнаруживаемого сигнала можно найти, например, в [3].

Вместе с тем, на практике анализ радиобстановки часто осложняется тем, что либо источник сигнала, либо КРК являются мобильными, а принимаемый приёмником КРК радиосигнал подвержен замираниям. В подобной ситуации часть входящих в (3) слагаемых $|\dot{c}_{(r)}(n)|^2$ будет иметь заметно меньшее значение, что будет приводить к снижению вероятности правильного обнаружения сигналов. Если, немного упрощая реальную ситуацию, предположить, что влияние замираний проявляется в снижении части значений отсчетов $X_r(n), X_{r+1}(n) \dots X_{r+R_w-1}(n)$ до шумового уровня, то для сохранения неизмен-

ной вероятности превышения порога статистикой (3) потребуется снизить этот порог примерно на поправочный коэффициент

$$coef \approx (0,8..0,9) \alpha \left(\frac{1}{1+h^2} - 1 \right), \quad (11)$$

где h^2 – отношение сигнал-шум без учета замираний, α – доля отсчетов $X_r(n)$, затронутых замираниями.

Определяемый соотношением (11) энергетический проигрыш можно скомпенсировать изменением протяженности полезного сигнала, достаточным для обнаружения этого сигнала с заданной достоверностью. Требуемое увеличение числа спектрограмм, необходимое для сохранения вероятности правильного обнаружения сигнала, может быть определено правилом

$$R_{new} = \left(\chi - \sqrt{\chi^2 + 1 - t_{\varepsilon} \sqrt{1 + coef}} \right)^2 / 9, \quad (12)$$

где $\chi = 0,5x_{\varepsilon}$, $coef$ – определяемый (11) поправочный коэффициент высоты энергетического порога.

Представленные на рис. 1 кривые, соответствующие правилу (12), показывают, что даже при доле затрагиваемых замираниями спектрограмм, составляющей $\alpha = 10..12\%$, требуемая для сохранения неизменной вероятности правильного обнаружения продолжительность обнаруживаемых сигналов возрастает на 60..75%. Таким образом, базирующийся на классической решающей статистике (3) алгоритм энергетического обнаружения оказывается весьма чувствительным к эффектам замираний сигналов.

Вместе с тем, можно попытаться избавиться от негативного замираний путем перехода к использованию альтернативной решающей статистики, опирающейся лишь на отсчеты спектрограмм, приходящихся на интервалы активности сигналов, где отсчеты $X_r(n)$, как правило, превышают энергетический порог обнаружения.

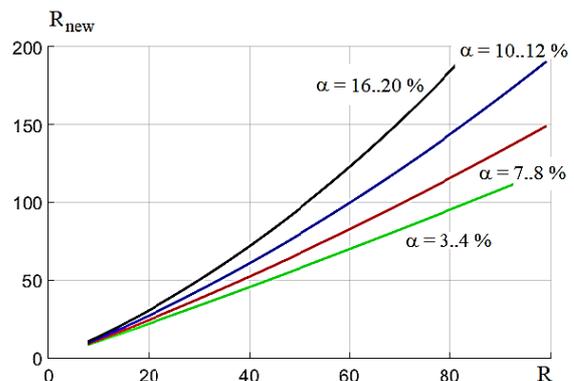


Рис. 1. Увеличение требуемой продолжительности сигналов при замираниях

Цель настоящей работы состоит в поиске и исследовании свойств алгоритма обнаружения слабых узкополосных радиосигналов, базирующегося на решающей статистике, отличающейся от (3), и сохраняющего эффективность при кратковременных провалах интенсивности сигналов (например, вследствие замираний).

Алгоритм обнаружения, ориентированный на работу в условиях замираний

Проанализируем типовую диаграмму изменения интенсивности спектральных отсчетов на несущей частоте узкополосного излучения, представленную на нижнем графике на рис. 2. При её формировании предполагалось, что до появления 13-й спектрограммы в эфире наблюдался лишь шум, затем до момента формирования 30-й спектрограммы действовал целевой сигнал, а позже вновь отсчетам $X_r(n)$ соответствовал лишь шум. Для выявления слабых сигналов был выбран сравнительно низкий порог x_{thr} , вследствие чего на стартовом и конечном участке наблюдались эпизодические превышения порога x_{thr} значениями $X_r(n)$, а на интервале наблюдения сигнала подавляющее большинство отсчетов спектра превышали этот порог. Факт частого превышения энергетического

порога на «сигнальном участке» даже при низких ОСШ и предполагается использовать в качестве основы обнаружения радиосигналов.

Обозначим через Y_r последовательность состояний анализируемого n -го спектрального бина

$$Y_r = \begin{cases} 1, & \text{если } X_r(n) \text{ превышает порог } x_{thr}, \\ 0, & \text{если порог не превышает.} \end{cases} \quad (13)$$

Тогда изменение радиообстановки на частоте ожидаемого сигнала на протяжении R_w спектрограмм (что соответствует ожидаемой продолжительности выхода в эфир) можно будет характеризовать вектором $W_r = \{Y_{r-(R_w-1)}, \dots, Y_r\}$, а для анализа вероятности наличия сигнала на временном интервале, стартующем от r -й по счёту спектрограммы, можно рекомендовать статистику

$$\gamma_{R_w}(n, r) = \sum_{j=r-(R_w-1)}^r Y_j, \quad (14)$$

в дальнейшем называемую интенсивностью потока превышений порога (ИПП).

Очевидно, что для временных интервалов, занятых сигналами, характерны высокие значения статистики $\gamma_{R_w}(n, r)$, приближающиеся к R_w , а на шумовых участках $\gamma_{R_w}(n, r) \ll R_w$.

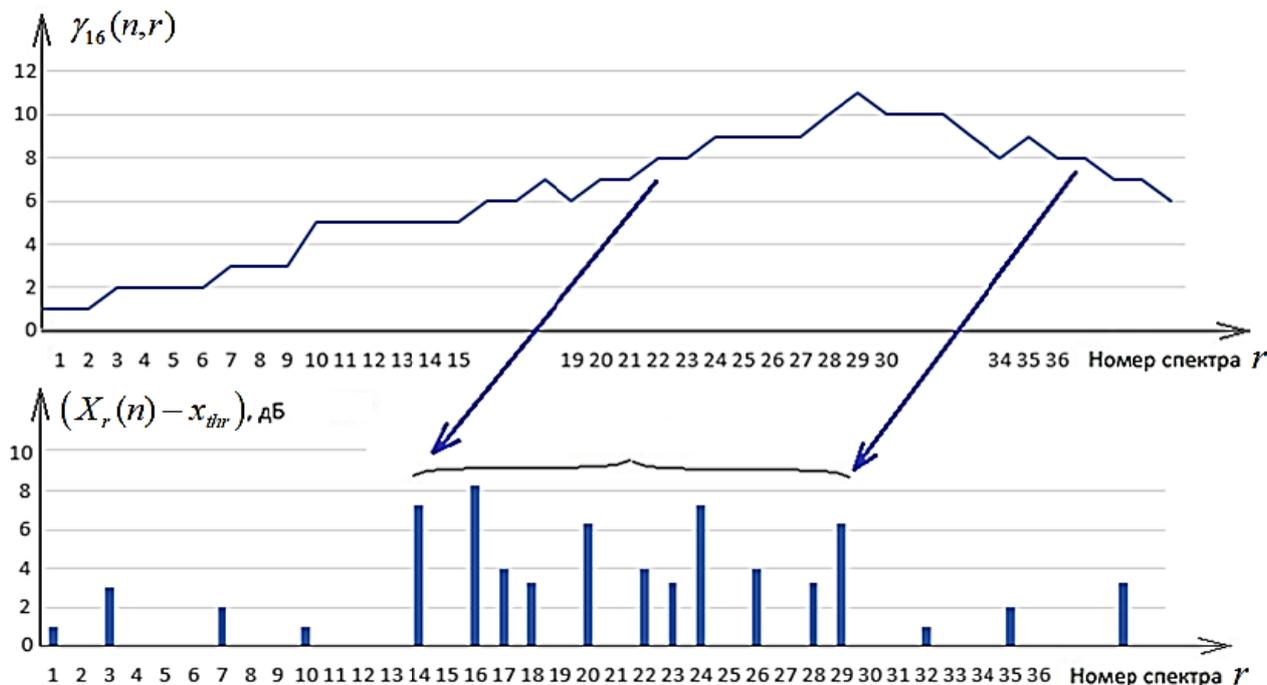


Рис. 2. Пример изменения интенсивности потока превышений порога $\gamma_{16}(n, r)$ при наблюдении слабого сигнала на оси времени между моментами получения 14-й ... 29-й спектрограмм

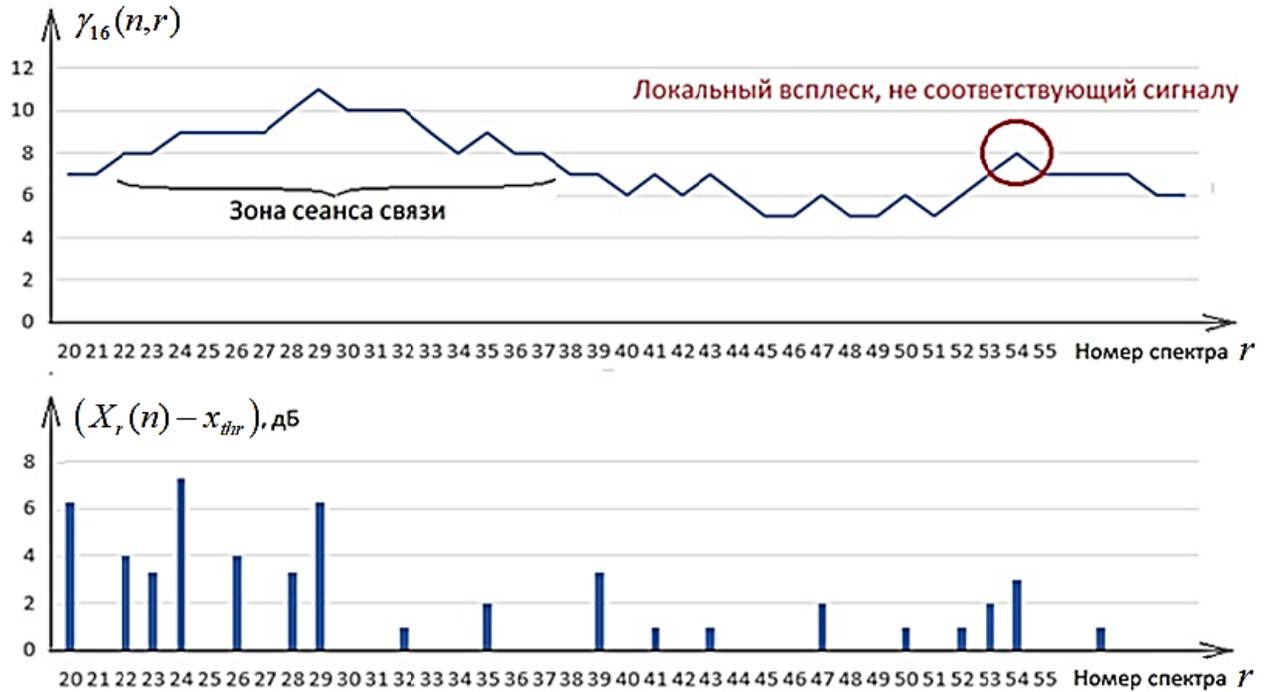


Рис. 3. Пример возникновения ложного локального всплеска статистики $\gamma_{16}(n, r)$

Примечание: авторы учитывают, что решающая статистика (14), учитывающая лишь факты превышения отсчетами $X_r(n)$ порога x_{thr} , может (и будет) уступать по качеству другим статистикам, учитывающим и степень превышения, однако в рамках настоящей статьи предполагают ограничиться изучением свойств и получением математического аппарата для анализа именно статистики (14), доказывая её работоспособность в условиях нестабильной интенсивности регистрируемых радиоизлучений. Доработка решающей ИПП-статистики будет предметом последующих исследований.

Для получения на базе статистики $\gamma_{R_w}(n, r)$ алгоритма обнаружения, сохраняющего работоспособность в условиях замираний, использовать порог, близкий к R_w , недопустимо. Вместе с тем, при заметном понижении порога нарастает риск ложного обнаружения сигналов. Так на рис. 3 представлен случай, когда при низком энергетическом пороге x_{thr} возникает всплеск ИПП-статистики (14), который может быть ошибочно интерпретирован как наличие сигнала. С учетом этого можно рекомендовать к использованию следующее решающее правило: выход целевого сигнала в эфир регистрируется, если существует интервал длиной L_{min} идущих подряд спектрограмм, для которых

$$\gamma_{R_w}(n, r) \geq \gamma_{tr}. \quad (15)$$

В рамках текущей работы минимальная продолжительность превышений порога ИПП-статистикой выбиралась равной $L_{min} = R_w / 2$, а оптимизация прочих параметров алгоритма (15) будет представлена в завершающей части работы.

Применение марковского приближения к оценке вероятности ложного обнаружения

При исследовании алгоритма (15) по-прежнему будем полагать, что шум, на фоне которого наблюдаются обнаруживаемые сигналы, можно считать нормальным белым с мощностью шума, приходящейся на каждый отсчет дискретного спектра, равной $\sigma_{\xi_1}^2$. При этом отсчеты $X_r(n)$ неусредненных спектрограмм (1) подчиняются показательному закону распределения

$$W_r(x) = \lambda^{-1} e^{-x/\lambda}, \quad x \geq 0, \quad (16)$$

с параметром $\lambda = \lambda_{ш}$ (5) для шумовых спектрограмм и параметром $\lambda = \lambda_c$ (10) на интервалах действия сигнала. Как следствие, каждое состояние Y_r будет определяться независимым распределением Бернулли с параметром

$$p_{thr} = P\{X_r(n) > x_{thr} | H_0\} = e^{-x_{thr}/\lambda_{ш}} \quad (17)$$

для шумовых спектрограмм и с параметром

$$P\{X_r(n) > x_{thr} | H_1\} = p_{thr}^{(1+h^2)^{-1}} \quad (18)$$

для спектрограмм, приходящихся на интервалы присутствия целевого сигнала. Величина $\gamma_{R_w}(n, r)$ будет при этом подчиняться биномиальному закону распределения

$$P_\gamma(g) = C_{R_w}^g p_{thr}^g (1 - p_{thr})^{R_w - g}, \quad g \in [0, R_w]. \quad (19)$$

Поведение алгоритма обнаружения может быть описано с помощью однородной дискретной марковской цепи с поглощающим состоянием [4]. Пространство состояний цепи определяется двумя целочисленными параметрами:

а) $g \in [0, R_w]$ – текущее значение статистики ИПП $\gamma_{R_w}(n, r)$ к моменту обработки r -й спектрограммы;

б) $\ell \in [0, L_{\min}]$ – текущая длина серии, в течение которой регистрировалось $\gamma_{R_w}(n) \geq \gamma_{\text{тр}}$. Сброс счетчика ℓ в 0 происходит, когда на очередном r -м спектре оказывается $\gamma_{R_w}(n, r) < \gamma_{\text{тр}}$.

Помимо представленных выше непоглощающих состояний, описываемых парой (g, ℓ) , цепь может переходить в дополнительное поглощающее состояние Θ , которое возникает при достижении уровня $\ell = L_{\min}$. При реальном отсутствии сигналов на анализируемом интервале переход в состояние Θ , будет соответствовать ложному обнаружению.

Размерность пространства состояний цепи конечна и равна $S = 1 + (R_w + 1) \cdot (L_{\min} + 1)$. Соответственно, для отражения текущего состояния цепи введем вектор-строку

$$\mathbf{v} = [P(\Theta), P(0, 0), P(0, 1) \dots P(R_w, L_{\min})] \quad (20)$$

размерности S , каждый элемент которого соответствует вероятности нахождения цепи в состоянии (g, ℓ) или поглощающем состоянии Θ .

Поскольку исследуемая марковская цепь инициализируется на R_w спектрограммах, то при $r < R_w$ у алгоритма обнаружения еще не имеется истории для накопления серии превышения порога $\gamma_{\text{тр}}$, а потому при $r < R_w$ не существует предыдущих значений статистики ИПП. Первые R_w спектрограмм определяют начальное состояние цепи; при этом начальное

значение счетчика серии ℓ может быть только двух видов:

а) $\ell = 0$: Если первая же статистика $\gamma_{R_w}(n, R_w)$ не превысила порог $\gamma_{\text{тр}}$ (т.е. $g < \gamma_{\text{тр}}$);

б) $\ell = 1$: Если первая же статистика $\gamma_{R_w}(n, R_w)$ превысила порог $\gamma_{\text{тр}}$ (т.е. $g \geq \gamma_{\text{тр}}$).

Как следствие, вектор \mathbf{v}_0 , соответствующий начальному состоянию цепи (при $r = R_w$), будет преимущественно включать нулевые вероятности кроме цепочки элементов

$$P(g, \ell) = \begin{cases} P_\gamma(g), & (g < \gamma_{\text{тр}}, \ell = 0) \text{ или } (g \geq \gamma_{\text{тр}}, \ell = 1) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (21)$$

При переходе к $(r + 1)$ -й спектрограмме скользящее окно наблюдения сдвигается очевидным образом $W_{r+1} = \{Y_{r-(R_w-2)}, \dots, Y_{r+1}\}$. В соответствии с этим статистика $\gamma_{R_w}(n, r)$ изменяется следующим образом:

$$\gamma_{R_w}(n, r+1) = \gamma_{R_w}(n, r) - Y_{r-(R_w-1)} + Y_{r+1}, \quad (22)$$

т.е. эволюция цепи из состояния (g, ℓ) на шаге $r \rightarrow (r + 1)$ определяется «отсечением» скользящим окном значения $Y_{r-(R_w-1)}$ и поступлением нового отсчета Y_{r+1} . Новое значение статистики ИПП (14) может принимать одно из трех значений $g - 1, g, g + 1$, вероятности появления которых составляют

$$\begin{aligned} P\{g' = g - 1\} &= \frac{g}{R_w} (1 - p_{thr}), \\ P\{g' = g\} &= \frac{g}{R_w} p_{thr} + \left(1 - \frac{g}{R_w}\right) (1 - p_{thr}), \\ P\{g' = g + 1\} &= \left(1 - \frac{g}{R_w}\right) p_{thr}. \end{aligned} \quad (23)$$

К сожалению, вывод аналитической формулы для перехода из состояния (g, ℓ) в состояние (g', ℓ') представляется очень громоздким, т.к. эта вероятность есть композиция двух разнородных элементов: стохастической части изменения g , определяемой (23), и детерминированной части ℓ , которая описывается исключительно алгоритмическими правилами:

1) Для поглощающего состояния справедливо $P\{\Theta \rightarrow \Theta'\} = 1$.

2) Для каждого состояния (g, ℓ) изменение $g \rightarrow g'$ определяется вероятностями перехода (23);

3) Для каждого из трех возможных значений g' новое значение счетчика ℓ' определяется детерминированным правилом:
 $g' \geq \gamma_{\text{тр}} \rightarrow \ell' = \ell + 1$, иначе $\ell' = 0$.

4) В зависимости от полученной пары (g', ℓ') мы относим вычисленную вероятность к переходу в то или иное состояние. Если $\ell' \geq L_{\text{min}}$, то эта вероятность прибавляется к вероятности перехода в поглощающее состояние. Иначе, полученная вероятность прибавляется к элементу матрицы переходных вероятностей \mathbf{P} , отвечающему за переход в состояние (g', ℓ') .

Предложенный подход позволяет сугубо алгоритмически, с помощью вложенных циклов, построить всю матрицу переходов \mathbf{P} любой размерности, не прибегая к выводу сложных аналитических выражений для каждого из тысяч её элементов.

Обозначим общее количество спектрограмм на участке анализа радиобстановки через R_{all} . Используя уравнение Колмогорова – Чепмена, описывающее эволюцию вероятностей состояния марковской цепи во времени [4], получим вектор $\mathbf{v}_{R_{\text{all}}-R_w}$, представляющий собой состояние цепи после сканирования $(R_{\text{all}} - R_w)$ спектрограмм скользящим окном:

$$\mathbf{v}_{R_{\text{all}}-R_w} = \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{P}^{R_{\text{all}}-R_w}. \quad (24)$$

Тогда при обработке последовательности шумовых спектрограмм вероятность оказаться в поглощающем состоянии (что будет соответствовать ложному обнаружению) после $(R_{\text{all}} - R_w)$ шагов составит

$$P_{\text{false}} = \mathbf{v}_{R_{\text{all}}-R_w} [1], \quad (25)$$

где индекс 1 соответствует поглощающему состоянию.

Соотношение (25) позволяет исследовать зависимость вероятности ложного обнаружения алгоритма (15) от вероятности p_{thr} превышения первичного энергетического порога, величины $\gamma_{\text{тр}}$ и минимальной длины L_{min} серии превышения ИПП-статистикой порога $\gamma_{\text{тр}}$. Соответствующие кривые для $R_{\text{all}} = 1000$, $L_{\text{min}} = R_w / 2 = 8$ и $\gamma_{\text{тр}} = \{ 8, 9, 10 \}$ представлены на рис. 4. Зависимости на рис. 4 показывают, что для получе-

ния вероятностей ложной тревоги менее 10^{-3} на этапе формирования статистики $\gamma_{R_w}(n, r)$ следует выбирать энергетический порог, вероятность превышения которого шумовыми отсчетами составляет

$$p_{\text{thr}} \approx 0,05 \dots 0,15. \quad (26)$$

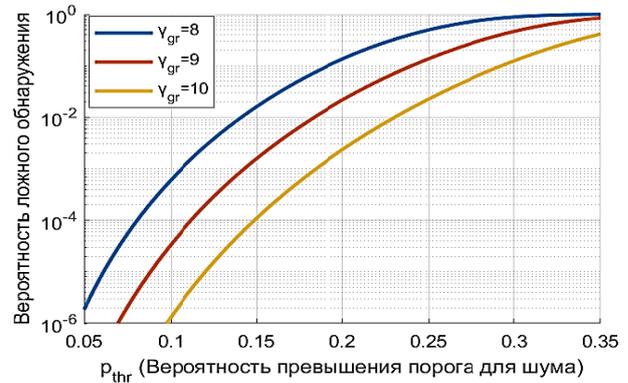


Рис. 4. Зависимость вероятности ложного обнаружения алгоритма (15) от выбора первичного энергетического порога p_{thr}

Оценка показателей качества алгоритма обнаружения на основе контроля интенсивности потока превышений порога

Для определения вероятности пропуска сигналов P_{miss} будем полагать, что полезный сигнал представляет собой узкополосный процесс, в полосе действия которого отношение сигнал-шум по мощности равно h^2 , а продолжительность сигнала соответствует времени, за которое приёмник КРК успевает зарегистрировать R_{sgn} спектрограмм. Под пропуском сигнала (независимо от выбора ширины скользящего окна R_w) мы будем понимать случаи, когда сканирование всех R_{sgn} спектрограмм, порожденных сигнальными отсчетами, не дало ни одного обнаружения. Если же факт наличия сигнала был установлен, пусть даже с ошибками в определении временных границ расположения сигнала, то такой случай будем квалифицировать как успешное обнаружение сигнала. Тогда вероятность успешного обнаружения может быть рассчитана по аналогии с (25), при замене входящих в (19) и (23) вероятностей на значения, характерные для сигнальных отсчетов энергетического спектра $X_r(n)$, определяемые (18). Результаты подобного расчета представлены на рис. 5.

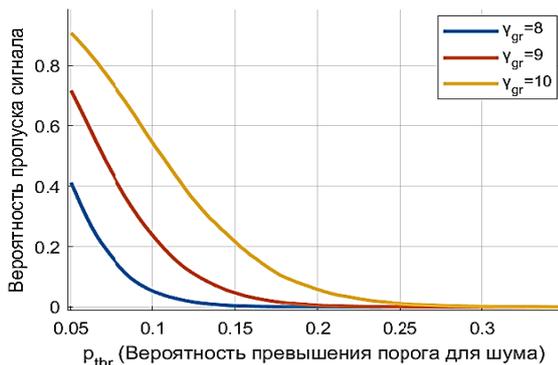


Рис. 5. Зависимость вероятности пропуска обнаружения алгоритма (15) от выбора первичного энергетического порога p_{thr} при $\gamma_{гр} = \{ 8, 9, 10 \}$,

$$L_{min} = 8, R_{all} = 1000, h^2 = 2, R_{sgn} = 100$$

Согласно рис. 5, попытка использования значений $\gamma_{гр} > R_w / 2$ влечет заметный рост P_{miss} , в то время как (рис. 4) при $\gamma_{гр} \ll R_w / 2$ оказывается избыточно большой вероятностью ложного обнаружения сигналов P_{false} . Вместе с тем, при p_{thr} , выбираемом согласно (26), даже для весьма слабых сигналов обеспечивается $P_{miss} < 0,1$, что уже может представлять интерес на практике.

Оптимизация параметров алгоритма

Оптимизация параметров анализируемого алгоритма существенно осложняется большим количеством параметров, влияющих на его показатели качества. Сочетания параметров, обеспечивающие эффективность при одной радиообстановке, могут оказаться далекими от оптимальности при иных параметрах сигналов и шумов. Вместе с тем, если какие-то сочетания параметров алгоритма позволяют успешно обнаруживать наиболее кратковременные сигналы по отношению к иным настройкам, то, очевидно, именно такие параметры можно рекомендовать к использованию.

Зафиксируем следующие требования к вероятностям ложного обнаружения и пропуска сигнала: $P_{false} \leq 10^{-3}$, $P_{miss} < 0,1$ и найдем интервалы значений p_{thr} и $\gamma_{гр}$, обеспечивающие достижение целевых вероятностей при минимальных длительностях сигналов R_{sgn} и ОСШ h^2 . Соответствующие сочетания значений, полученные с помощью численного моделирования, представлены в табл. 1-5.

Таблица 1
Рабочие диапазоны p_{thr} для $L_{min} = 8$,
 $h^2 = 5, R_{sgn} = 30$

$\gamma_{гр}$	$P_{false} \leq 10^{-3}$	$P_{miss} \leq 0,1$	p_{thr}
6	[0.000, 0.047]	[0.020, 0.990]	[0.020, 0.047]
7	[0.000, 0.073]	[0.040, 0.990]	[0.040, 0.073]
8	[0.000, 0.100]	[0.073, 0.990]	[0.073, 0.100]
9	[0.000, 0.140]	[0.113, 0.990]	[0.113, 0.140]

Таблица 2
Рабочие диапазоны p_{thr} для $L_{min} = 8$,
 $h^2 = 4, R_{sgn} = 40$

$\gamma_{гр}$	$P_{false} \leq 10^{-3}$	$P_{miss} \leq 0,1$	p_{thr}
6	[0.000, 0.047]	[0.020, 0.990]	[0.020, 0.047]
7	[0.000, 0.073]	[0.040, 0.990]	[0.040, 0.073]
8	[0.000, 0.100]	[0.066, 0.990]	[0.066, 0.100]
9	[0.000, 0.140]	[0.106, 0.990]	[0.106, 0.140]
10	[0.000, 0.179]	[0.166, 0.990]	[0.166, 0.179]

Таблица 3
Рабочие диапазоны p_{thr} для $L_{min} = 8$,
 $h^2 = 3, R_{sgn} = 50$

$\gamma_{гр}$	$P_{false} \leq 10^{-3}$	$P_{miss} \leq 0,1$	p_{thr}
6	[0.000, 0.047]	[0.033, 0.990]	[0.033, 0.047]
7	[0.000, 0.073]	[0.053, 0.990]	[0.053, 0.073]
8	[0.000, 0.100]	[0.086, 0.990]	[0.086, 0.100]
9	[0.000, 0.140]	[0.126, 0.990]	[0.126, 0.140]

Таблица 4
Рабочие диапазоны p_{thr} для $L_{min} = 8$,
 $h^2 = 2, R_{sgn} = 100, P_{false} \leq 10^{-3}$

$\gamma_{гр}$	$P_{false} \leq 10^{-3}$	$P_{miss} \leq 0,1$	p_{thr}
6	[0.000, 0.047]	[0.033, 0.990]	[0.033, 0.047]
7	[0.000, 0.073]	[0.060, 0.990]	[0.060, 0.073]
8	[0.000, 0.100]	[0.086, 0.990]	[0.086, 0.100]
9	[0.000, 0.140]	[0.133, 0.990]	[0.133, 0.140]

Таблица 5
Рабочие диапазоны p_{thr} для $L_{min} = 8$,
 $h^2 = 4, R_{sgn} = 100, P_{false} \leq 10^{-4}$

$\gamma_{гр}$	$P_{false} \leq 10^{-4}$	$P_{miss} \leq 0,1$	p_{thr}
6	[0.000, 0.027]	[0.007, 0.990]	[0.007, 0.027]
7	[0.000, 0.053]	[0.013, 0.990]	[0.013, 0.053]
8	[0.000, 0.080]	[0.020, 0.990]	[0.020, 0.080]
9	[0.000, 0.106]	[0.033, 0.990]	[0.033, 0.106]
10	[0.000, 0.146]	[0.060, 0.990]	[0.060, 0.146]
11	[0.000, 0.186]	[0.100, 0.990]	[0.100, 0.186]
12	[0.000, 0.233]	[0.159, 0.990]	[0.159, 0.233]

На основе анализа результатов параметрической оптимизации, представленных в табл. 1-5, можно сформулировать итоговые рекомендации по выбору квазиоптимальных параметров алгоритма. Порог $\gamma_{гр}$ принятия решения по ИПП-статистике рекомендуется выбирать из диапазона $(R_w/2 - 2) \dots R_w/2$, а энергетический порог x_{thr} таким, чтобы для шумовых отсчетов спектрограмм вероятность его превышения удовлетворяла требованиям

$$0,05 \leq p_{thr} \leq 0,1. \quad (27)$$

Для сигналов с низким ОСШ ($h^2 \leq 2$) для сохранения высокой достоверности обнаружения требуется увеличение длительности анализа. Наблюдаемый в табл. 1-5 запас по выбору p_{thr} подтверждает робастность алгоритма для относительно широкого сочетания условий радиоб обстановки.

Оценка работоспособности алгоритма в условиях замираний

Для определения влияния замираний на возможность обнаружения сигналов алгоритмом, базирующемся на ИПП-статистике, было произведено моделирование, в ходе которого формировался набор из $3 \cdot R_{sgn}$ спектрограмм, в котором первые и последние R_{sgn} спектрограмм были шумовыми, а центральные спектрограммы были сигнальными. Затем некоторые из сигнальных спектрограмм, выбираемые случайно и составляющие долю α от R_{sgn} , вновь заменялись шумовыми, тем самым отражая наличие замираний. Пропуск сигнала, как и ранее, фиксировался при условии, что обработка центральной последовательности спектрограмм не завершалась фиксацией сигнала. Результаты оценивания влияния замираний представлены на рис. 6 при параметрах $L_{min} = 8$, $\gamma_{гр} = 8$, $h^2 = 2$, $R_{sgn} = 100$, $P_{false} \leq 10^{-3}$.

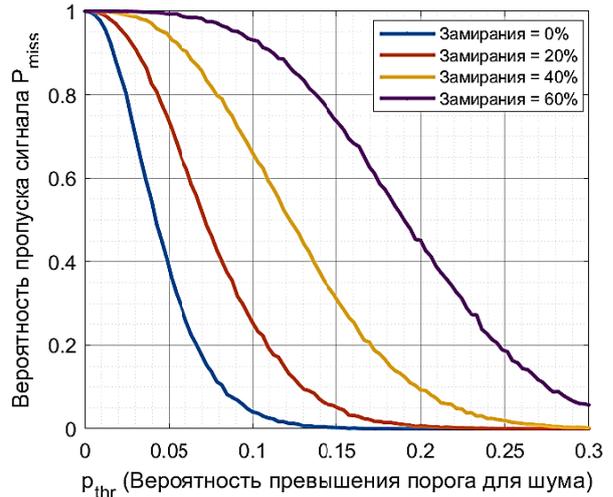


Рис. 6. Влияние замираний на показатели эффективности алгоритма обнаружения

Таблица 6

Увеличение требуемой продолжительности сигналов при доле спектрограмм поражаемых замираниями α для $L_{min} = 8$, $R_{sgn} = 100$,

$$P_{false} \leq 10^{-3}$$

α	h^2	$\gamma_{гр}$	$R_{sgn\ new}$	p_{thr}
10%	2	9	150	[0.136, 0.140]
10%	2	8	138	[0.088, 0.1]
10%	2	7	125	[0.062, 0.073]
10%	2	6	110	[0.033, 0.047]
20%	2	9	200	[0.137, 0.140]
20%	2	8	195	[0.091, 0.1]
20%	2	7	165	[0.063, 0.073]
20%	2	6	130	[0.046, 0.047]
30%	3	9	150	[0.131, 0.14]
30%	3	8	130	[0.091, 0.1]
30%	3	7	100	[0.066, 0.073]
30%	3	6	90	[0.040, 0.047]

Замирания влекут явное снижение качественных показателей алгоритма, однако рост вероятности пропуска сигналов можно компенсировать за счет увеличения продолжительности пребывания сигнала в эфире. В табл. 6 указано такое минимальное значение $R_{sgn\ new}$, при котором вновь обеспечиваются вероятности $P_{false} \leq 10^{-3}$ и $P_{miss} \leq 0,1$. Как следует из полученных данных для сохранения показателей качества алгоритма при $h^2 = 2$, $R_{sgn} = 100$, $\alpha = 10\%$ требуется увеличение R_{sgn} на 10..50%, что заметно меньше увеличения на 60..75%, требуе-

мого при использовании классического алгоритма, базирующегося на статистике (3). Снижению чувствительности к замираниям способствует выбор порога $\gamma_{гр} < R_w / 2$.

Заключение

В системах радиоконтроля для анализа радиообстановки в широких полосах частот часто используют решающие статистики, базирующиеся на дискретном энергетическом спектре, формируемом с помощью БПФ. Узкополосные радиоизлучения при этом в каждой из спектрограмм характеризуются, как правило, единственным отсчетом (спектральным бином). При использовании энергетического обнаружения спектральные отсчеты сильных сигналов практически гарантированно превышают порог обнаружения, что обеспечивает их надёжную регистрацию. Для слабых сигналов вероятность превышения порога далека от единицы (хотя и заметно больше аналогичной вероятности для отсчетов шума), а потому установление факта появления сигнала в эфире (и, тем более, правильного определения его временных границ) становится проблематичным.

В работе предложен алгоритм обнаружения слабых узкополосных сигналов, наблюдаемых в широких полосах частот, базирующийся на контроле интенсивности потока превышений порога для совокупности отсчетов из последова-

тельности смежных по времени спектрограмм. На основе математического описания марковских цепей определены показатели качества разработанного алгоритма. Показано, что при выявлении сигналов, интенсивность которых подвержена замираниям, разработанный алгоритм оказывается существенно менее чувствительным к кратковременным пропадающим сигналам, чем алгоритм, базирующийся на классической решающей статистике.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны разработчикам систем радиоконтроля для слежения за радиообстановкой в широких полосах частот.

Литература

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. 4-е изд., испр. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 640 с.
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А.М. Рембовского. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 424 с.
3. Измерение занятости радиочастотного спектра в системах радиомониторинга: монография / А.Б. Токарев, Ю.С. Балашов, С.Ю. Белецкая, С.Н. Паньчев, П.П. Чураков; под ред. А.Б. Токарева. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. 227 с.
4. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. Москва : Советское радио, 1977. 488 с.

Поступила 15.11.2025; принята к публикации 01.02.2025

Информация об авторах

Моисеев Дмитрий Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dimonmoiseev48@mail.ru

Токарев Антон Борисович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); старший научный сотрудник, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: tokarevab@ircos.vrn.ru, ORCID: 0000-0002-2621-4336

Detection of weak narrowband signals based on monitoring the intensity of threshold exceedances by spectral samples

D.A. Moiseev¹, A.B. Tokarev^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC «IRCOS», Voronezh, Russia

Abstract. Efficient operation of most information transmission systems requires providing fairly high signal-to-noise ratios (SNR) at the receiver side, as defined by standard requirements. Unlike such systems, radio monitoring complexes (RMC) are forced to analyze the radio environment under various, including low, SNRs. Although under unfavorable conditions it is problematic to count on subsequent qualitative signal analysis, it seems necessary to ensure at least high sensitivity of RMC to the appearance of radio emissions in the analyzed frequency range under the parallel requirement of minimizing hardware and time costs for signal detection. In this article, the object of detection will be weak narrowband radio emissions having noise-

like character. With stable intensity of such signals at the reception point, a decision statistic based on dividing the controlled radio range into narrow frequency bands and comparing the observed average radiation power in this band with a threshold can be recommended for their detection. However, under fading conditions, the efficiency of this approach decreases, and the lack of detailed signal structure information at the RMC significantly complicates the search for an optimal detection method. The aim of the work is to find a quasi-optimal algorithm for detecting noise-like narrowband signals in a wide frequency band and to study the influence of processing parameters on the qualitative indicators of the algorithm. The practical significance of the research consists in the development of an algorithm for detecting weak narrowband signals based on monitoring the intensity of the flow of threshold exceedances by spectral samples, a mathematical apparatus for studying its quality indicators based on methods of Markov chain analysis, as well as in the basic optimization of processing parameters ensuring the quasi-optimality of the proposed algorithm.

Key words: radio monitoring; weak narrowband radio signals; Markov chains; detection parameters optimization

References

1. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A. “Radiomonitoring: tasks, methods, means” (“Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva”), Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2015, 640 p.
2. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A. “Automated radio monitoring systems and their components” (“Avtomatizirovannye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty”), Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2017, 424 p.
3. Tokarev A.B., Balashov Yu.S., Beletskaya S.Yu., Panychev S.N., Churakov P.P. “Measurement of radio frequency spectrum occupancy in radio monitoring systems” (“Izmerenie zanyatosti radiochastotnogo spektra v si-stemakh radiomonitoringa”), monograph, Voronezh State Technical University, 2016, 227 p.
4. Tikhonov V.I., Mironov M.A. “Markov processes”, Moscow: Sovetskoye Radio, 1977, 488 p.

Submitted 15.11.2025; revised 01.02.2025

Information about the authors

Dmitriy A. Moiseev, student, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dimonmoiseev48@mail.ru

Anton B. Tokarev, Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Senior Staff Scientist, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: 0000-0002-2621-4336

Оценка параметров канала системы связи с OFDM при заранее известном количестве лучей и постоянстве задержек между ними

А.А. Малютин, М.Д. Портниченко, А.Н. Зюзин

АО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Решается задача высокоточного оценивания параметров канала для систем связи с ортогональным частотным разделением (OFDM) в условиях, характерных для коротковолнового (КВ/ДКМВ) диапазона и других сценариев с квазидетерминированной структурой многолучевого распространения. Основная особенность рассматриваемого канала — известное и постоянное во времени количество интерферирующих лучей, а также фиксированные (неизменные) величины задержек между ними. В то время как комплексные коэффициенты (амплитуды и фазы) этих лучей могут изменяться случайным образом, знание статической задержковой структуры представляет собой ценную априорную информацию, которая традиционными статистическими методами оценки канала используется не в полной мере или не используется вовсе. Предлагается новый алгоритм, который органично объединяет переход из частотной области оценивания во временную с процедурой понижения ранга корреляционной модели канала до числа физических лучей. Этот подход позволяет существенно снизить размерность оцениваемого параметрического пространства. На основе полученной компактной модели строится эффективная оценка, сочетающая в себе простоту и робастность метода наименьших квадратов с оптимальными в среднеквадратическом смысле свойствами линейной MMSE (Minimum mean-squared error)-оценки, но применяемой уже не ко всем коэффициентам передаточной функции, а к существенно меньшему числу параметров, характеризующих весовые коэффициенты при заранее рассчитанных базисных функциях. Эти базисные функции, формирующие подпространство сигнала, однозначно определяются известными значениями межлучевых задержек, что и является ключевым отличием и источником потенциального выигрыша предлагаемого метода.

Ключевые слова: оценка параметров канала по пилотам; многолучевой канал связи; технология OFDM; ДКМВ-канал; оценка по методу наименьших квадратов (МНК); оценка с минимальной среднеквадратической ошибкой (СКО)

Введение

Несмотря на обширную научную литературу, посвящённую оценке канала в OFDM-системах, универсальные статистические методы зачастую не учитывают специфические особенности конкретных каналов. Большинство из них основывается на полностью случайной модели параметров канала, оценивая все его характеристики, включая задержки, как случайные величины. В данной работе рассматривается важный для практики класс многолучевых каналов, для которых характерно стабильное, заранее известное количество лучей с постоянными во времени межлучевыми задержками. Такая квазидетерминированная структура типична, например, для коротковолновых (КВ/ДКМВ) каналов связи, где задержки могут оставаться неизменными на протяжении длительных интервалов, в то время как комплексные амплитуды лучей флуктуируют. Использование этой априорной информации является ключом к существенному повыше-

нию точности оценки передаточной функции, что критически важно для когерентных систем с высокоэффективными видами модуляции.

В работе предлагается модифицированный алгоритм оценки по пилот-сигналам, развивающий известные методы понижения порядка, основанные на переходе между частотной и временной областями. Если ранее основной целью подобных подходов было снижение вычислительной сложности, то предложенная модификация сфокусирована именно на повышении точности. Это достигается за счёт жёсткого учёта априорных знаний о фиксированной структуре задержек при построении оптимальной оценки, что позволяет радикально сократить размерность решаемой задачи и эффективно разделить процедуры оценивания медленных (задержки) и быстрых (комплексные амплитуды) параметров канала.

Система обозначений

В работе будем использовать следующие обозначения: $h_{L \times 1}$ - вектор низкочастотного эквивалента импульсной характеристики (ИХ) канала; $H_{M \times N}$ - матрица коэффициентов пере-

даточной функции на частотно-временной плоскости для принимаемого OFDM сигнала из N символов и имеющего M поднесущих; $H_{M_p \times N_p}^{(p)}$ - матрица коэффициентов передаточной функции для пилотных позиций; $F_{M \times M}$ - матрица дискретного преобразования Фурье размера $M \times M$ с элементами $F_{nk} = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp\left\{-j2\pi \frac{nk}{M}\right\}$; $X_{M \times N}$ - матрица передаваемых информационных символов, требующих когерентной демодуляции (QAM, PSK и т.д.); $X_{M_p \times N_p}^{(p)}$ - матрица пилотных символов размера $M_p \times N_p$; $Y_{M \times N}$ - матрица принимаемых информационных N символов OFDM сигнала с M поднесущими. Столбцы и строки вышеназванных матриц будут обозначаться теми же буквами, выделяемыми жирным шрифтом, но с указанием соответствующей размерности. Иногда для ясности будет использоваться нотация языка MATLAB «:», означающая массив элементов в пределах указанных индексов по каждой из размерностей. Транспонирование матрицы X обозначается верхним индексом (X^T), гильбертово сопряжение матрицы X – верхним индексом (X^H), псевдоинверсия Мура-Пенроуза матрицы X обозначается как $X^\# = (X^H X)^{-1} X^H$. Операция вычисления следа матрицы обозначается как $\text{tr}\{\dots\}$. Операция векторизации матрицы (преобразование матрицы в строку, располагая её столбцы один под другим) обозначается как $x_{MN \times 1} = \text{vec}\{X_{M \times N}\}$, обратная векторизации операция обозначается символом $X_{M \times N} = \text{invvec}\{x_{MN \times 1}\}$. Умножение Адамара матриц (поэлементное умножение элементов матриц) обозначается как $Y = X \odot H$. Разбиение матрицы на подматрицы обозначается указанием подматриц внутри квадратных скобок. Квадратная единичная матрица размера $M \times M$ обозначается как I_M . $M \times N$ матрица, состоящая из всех нулевых элементов, обозначается как $0_{M \times N}$. Символ $E\{\dots\}$ означает операцию вычисления математического ожидания. Символ $\delta(\dots)$ обозначает дельта функцию.

Математическая формулировка задачи.

Описание канала и системы связи

Канал связи представляет собой N_{path} -лучевой канал, описываемый импульсной характеристикой вида:

$$g(\tau, t) = \sum_{i=0}^{N_{path}-1} \alpha_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t) T_s). \quad (1)$$

Поскольку канал связи является нестационарным, то для его описания вводятся понятия т.н. «медленного» и «быстрого» времени t и τ , соответственно. Первое относится к описанию изменения канала во времени, т.е. описывает изменение коэффициентов в (1) во времени, второе представляет собой задержку в данный момент времени, как если бы канал был стационарным. Задержка $\tau_m(t) T_s$, где $\tau_i(t)$ - дробное безразмерное число, в общем случае, также зависит от времени. Будем рассматривать каналы связи, для которых в соответствии с их реальной физической моделью межлучевую задержку можно считать постоянной (например, ДКМВ каналы связи).

Коэффициенты передачи каждого из лучей представляют собой комплексные величины. Для ДКМВ канала, согласно стандартной модели Ваттерсона, они описываются стационарными гауссовскими случайными процессами с соответствующими параметрами [1, 2].

Импульсная характеристика канала, описываемая (1), недоступна непосредственному практическому измерению, т.к. сигнал на выходе приёмника наблюдается в дискретизированном виде, а не в непрерывном времени. Интервал дискретизации может быть как больше, так и меньше межлучевых задержек. Непосредственно измеряемым может быть только низкочастотный эквивалент импульсной характеристики (НЧ эквивалент ИХ).

В предположении идеального низкочастотного фильтра после цифро-аналогового преобразования как на стороне Tx, так и после аналогово-цифрового преобразования на стороне Rx будем иметь низкочастотный эквивалент дискретизированной импульсной характеристики канала в виде:

$$h(t) = [h_0(t), \dots, h_{L-1}(t)]^T,$$

где:

$$h_k(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_i \alpha_i(t) \exp\left\{-j \frac{\pi}{M} (k + (M-1)\tau_m(t))\right\} \frac{\sin(\pi\tau_m(t))}{\sin\left(\frac{\pi}{M}(\tau_m(t)-k)\right)}. \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо в предположении, что частоты среза идеальных низкочастотных фильтров равны величине $\frac{1}{T_s}$, обратной частоте дискретизации сигнала T_s . Длина вектора h должна быть строго меньше длины циклического префикса, но будет всегда больше или равной количеству интерферирующих лучей N_{path} . Равенство $N_{path} = L$ будет иметь место при кратности всех межлучевых

задержек интервалу дискретизации T_s , т.е. когда $\tau_i(t)$ - целое число. При его нарушении будет иметь место эффект «удлинения» («растекания») импульсной характеристики при переходе к её низкочастотному эквиваленту. Наибольшее «растекание» будет иметь место при задержке одного из лучей, равной половине интервала дискретизации. Отметим важное обстоятельство, используемое в дальнейшем: ранг корреляционной матрицы (КМ) для вектора h всегда равен количеству лучей N_{path} независимо от длины вектора h в силу независимости коэффициентов передачи лучей $\alpha_i(t)$: $rank(E\{hh^H\}) = N_{path}$.

Будем использовать стандартное описание системы OFDM, предполагающее достаточную длину циклического префикса для полного устранения межсимвольной интерференции и сохранения ортогональности частотных подканалов. Замирания предполагаются достаточно медленными, позволяющими считать передаточную функцию канала неизменной на протяжении одного OFDM символа. Временная синхронизация полагается идеальной, первый луч всегда имеет нулевую задержку.

Принимаемый сигнал, поступающий на вход устройства оценки канала (формирующего \hat{H}) имеет вид $Y_{M \times N} = H_{M \times N} \odot X_{M \times N} + (W + Z)$, где \odot означает произведение Адамара (поэлементное умножение); $H = Fh$ - матрица, описывающая передаточную характеристику канала на частотно-временной плоскости ($H \in \mathbb{C}^{M \times N}$, каждый её элемент $H_{i,j}$ представляет собой соответствующий комплексный коэффициент передаточной функции для символа OFDM, т.е. $y_{i,j} = H_{i,j}x_{i,j}$ на (i,j) -й частотно-временной позиции, где i - номер поднесущей, j - номер временного интервала); $X = [x_0, \dots, x_{N-1}]$ - $M \times N$ матрица передаваемых данных (включая пилотные символы); $x_n = [x_{0,n}, \dots, x_{M-1,n}]^T$ - OFDM символ, занимающий все частотные позиции для соответствующего временного интервала; выражение в скобках – смесь шума с помехами. Шум предполагается белым гауссовским. Сам передаваемый сигнал X , в свою очередь, образуется в результате последовательности следующих операций: обратного дискретного преобразования Фурье информационной последовательности промодулированных символов $X = Fx$, добавления циклического префикса из N_{CP} символов

$X = [X_{M-N_{CP}}, \dots, X_{M-1}, X_0, \dots, X_{M-1}]^T$, прохождения многолучевого канала связи, описываемого операцией свёртки с НЧ эквивалентом ИХ канала, добавления смеси шума с помехами, устранения циклического префикса на приёмной стороне.

После удаления циклического префикса на стороне приёма сигнал, передаваемый на i -й поднесущей в момент времени, соответствующий j -му временному слоту, может быть записан как:

$$Y_{i,j} = H_{i,j}X_{i,j} + (W_{i,j} + Z_{i,j}), \quad (3)$$

где $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$ - сигналы на входе и выходе канала (передаваемый и принимаемый сигналы), $(W_{i,j} + Z_{i,j})$ - сигнал помехи в смеси с шумом на входе детектора приёмника. Число поднесущих OFDM сигнала - M , число временных слотов, по которым производится оценка канала - N .

Оценка по минимуму наименьших квадратов находится как $\hat{H}^{(LS)} = \underset{H}{\operatorname{argmin}}\{\|y - Hx\|_2^2\}$, где $\|\dots\|_2^2$ означает евклидову норму вектора. При вычислении данной оценки на частотно-временных позициях для пилотных сигналов $X_{i,j}^{(p)}$ будем просто иметь:

$$\hat{H}_{i,j}^{(LS,p)} = \frac{Y_{i,j}^{(p)}}{X_{i,j}^{(p)}}. \quad (4)$$

Вывод предлагаемого алгоритма оценки

Матрица символов передаваемого сигнала содержит как информационные, так и известные на приёме, пилотные символы, образующие матрицу $X_{M_p \times N_p}^{(p)}$. Матрица коэффициентов передачи канала для последовательно передаваемых N OFDM символов может быть представлена в виде: $H_{M \times N} = [H_{M \times N}(:,1), \dots, H_{M \times N}(:,N)]$. Каждый i -й элемент данной матрицы представляет собой дискретное Фурье преобразование от низкочастотного эквивалента импульсной характеристики канала. В случае длины импульсной характеристики меньшей числа поднесущих OFDM сигнала $M > L$ можно записать:

$$H_{M \times 1}(:, m) = F_M \begin{bmatrix} h_{L \times 1} \\ 0_{(M-L) \times 1} \end{bmatrix}.$$

Тогда, разбивая матрицу преобразования Фурье на подматрицы: $F_M = [\tilde{F}_{M \times L} \tilde{F}_{M \times (M-L)}]$ будем иметь:

$$H_{M \times 1}(:, m) = \tilde{F}_{M \times L} h_{L \times 1}(m). \quad (5)$$

Рассмотрим m -й столбец частотно-временной матрицы, содержащий $M_p(m)$ пилотных символов и, соответственно, $M - M_p(m)$ информационных символов. С учётом (3) для пилотных символов m -го столбца будет справедливо:

$$Y_{M_p(m) \times 1}^{(p)}(:, m) = H_{M_p(m) \times 1}^{(p)}(:, m) X_{M_p(m) \times 1}^{(p)}(:, m) + (W + Z).$$

Обозначая $\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)}$ матрицу, полученную из матрицы $\tilde{F}_{M \times L}$ вычёркиванием строк, не содержащих пилоты, будем иметь:

$$Y_{M_p(m) \times 1}^{(p)}(:, m) = \tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} h_{L \times 1}^{(p)}(:, m) X_{M_p(m) \times 1}^{(p)}(:, m),$$

из которого с учётом вида LS оценки по пилотам следует:

$$H_{M_p(m) \times 1}^{(LS)} = \tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} h_{L \times 1}^{(p)}(:, m). \quad (6)$$

Последнее выражение представляет собой переопределённую систему линейных уравнений относительно вектора отсчётов импульсной характеристики для m -го столбца $h_L(:, m)$, которая имеет решение:

$$\hat{h}_{L \times 1}(:, m) = \left(\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \right)^{\#} H_{M_p(m) \times 1}^{(LS)}. \quad (7)$$

Тогда, с учётом (5), оценка каждого вектора столбца матрицы коэффициентов может быть найдена как:

$$\hat{H}_{M \times 1}(:, m) = \tilde{F}_{M \times L} \left(\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \right)^{\#} H_{M_p(m) \times 1}^{(LS)}. \quad (8)$$

Выражение (8) не содержит требуемых ограничений на $h_{L \times 1}$, заключающихся в постоянстве задержек для всех лучей в исходной ИХ канал $g(t)$, из которой был получен вектор $h_{L \times 1}$ по (2). Для их учёта запишем КМ для вектора $h_{L \times 1}$, $R_{hh}(m) = E\{hh^H\}$. Ранг корреляционной матрицы равен количеству интерферирующих лучей в случае их статистической независимости (это всегда выполняется) и не зависит от количества элементов вектора низкочастотного эквивалента L , получаемого преобразованием из $g(\tau, t = t_m)$ в $h_{L \times 1}(:, m)$ по (2). С учётом постоянства задержек, разложение КМ $R_{hh}(m)$ имеет вид: $R_{hh}(m) = U_{L \times L} \Lambda_{L \times L}(m) U_{L \times L}^H$, где от временного индекса m зависит только матрица собственных чисел, а диагональная матрица собственных векторов не зависит от него. Кроме того, матрица собственных векторов содержит только N_{path} ненулевых элементов и, следовательно, разложение может быть представлено в сокращённом виде с учётом уменьшенного ранга:

$$R_{hh}(m) = \tilde{U}_{L \times N_{path}} \tilde{\Lambda}_{L \times N_{path}}(m) \tilde{U}_{L \times N_{path}}^H, \quad (9)$$

где диагональная матрица $\tilde{\Lambda}_{L \times N_{path}}$ составлена только из ненулевых элементов матрицы $\Lambda_{L \times L}(m)$, а матрица собственных векторов $\tilde{U}_{L \times N_{path}}$ составлена только из соответствующих этим ненулевым элементам столбцов матрицы $U_{L \times L}$. При наложенных ограничениях матрицы собственных векторов могут быть рассчитаны без расчёта КМ и последующего разложения по собственным векторам и собственным числам и без сингулярного разложения матрицы данных. На основе разложения (9) вектор, являющийся НЧ эквивалентом ИХ, может быть представлен как:

$$h = \tilde{U}_{L \times N_{path}} f_{N_{path} \times 1}, \quad (10)$$

где $f_{N_{path} \times 1}$ - некий неизвестный вектор весовых коэффициентов при столбцах заранее известной матрицы собственных векторов уменьшенного ранга КМ НЧ вектора ИХ. Подставляя (10) в (6) будем иметь переопределённую систему уравнений относительно $f_{N_{path} \times 1}(:, m)$:

$$\hat{H}_{M_p(m) \times 1}^{(LS)} =$$

$$\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \tilde{U}_{L \times N_{path}} f_{N_{path} \times 1}(:, m).$$

Её решением будет: $\hat{f}_{N_{path} \times 1}(:, m) =$

$\left(\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \tilde{U}_{L \times N_{path}} \right)^{\#} \hat{H}_{M_p(m) \times 1}^{(LS)}$. Тогда оценкой вектора НЧ эквивалента ИХ для m -й временной позиции с учётом (7) будет:

$$\hat{h}_{L \times 1}(m) =$$

$$\tilde{U}_{L \times N_{path}} \left(\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \tilde{U}_{L \times N_{path}} \right)^{\#} H_{M_p(m) \times 1}^{(LS)},$$

а оценкой векторов передаточной функции, образующих искомую матрицу оценок коэффициентов $\hat{H}_{M \times 1}$, с учётом ограничения на постоянство и известность количества лучей и задержек между ними, будет:

$$\hat{H}_{M \times 1}(:, m) =$$

$$\tilde{F}_{M \times L} \tilde{U}_{L \times N_{path}} \left(\tilde{F}_{M_p(m)}^{(p)} \tilde{U}_{L \times N_{path}} \right)^{\#} \hat{H}_{M_p(m) \times 1}^{(LS)}.$$

Таким образом могут быть найдены все коэффициенты передачи в столбцах, содержащих пилотные символы, но полученное решение никак не учитывает возможную взаимную корреляцию оценок на частотно-временной матрице, которая может быть заранее получена и должна быть учтена. Для оценки всех коэффициентов передачи во всех столбцах, в том числе и не содержащих пилотных символов, необходимо выполнить интерполяцию на основе знания коэффициентов передачи в пилотных

столбцах и, возможно, с учётом статистики канала. Подобная интерполяция может выполняться различными методами [3,4]. Наилучшие варианты при отсутствии информации о статистике канала должны быть построены на отдельной интерполяции амплитуды и фазы коэффициентов передачи тем или иным способом. Но, располагая статистикой канала, как минимум, второго порядка наилучшим решением будет использование линейной оценки, минимизирующей среднеквадратическую ошибку (LMMSE). В нашем случае, в отличие от классического варианта MMSE, оценка канала для частотных столбцов ЧВМ, не содержащих пилотных символов будет проводиться не для коэффициентов передачи для каждой позиции ЧВМ - $H_{i,j}$, а для комплексного множителя $f_{N_{path} \times 1}$ при каждой собственной функции в (10). А затем, с учётом (10), будет рассчитан вектор отсчётов передаточной функции:

$$\tilde{H}_{M \times 1}(:, m) = \tilde{F}_{M \times L} \tilde{U}_{L \times N_{path}} \hat{h}_{L \times 1}^{(LMMSE)}(:, m).$$

Благодаря существенно меньшему количеству оцениваемых параметров, точность оценки должна быть выше.

Таким образом выполняется процедура оценки канала, состоящая в определении коэффициентов передаточной функции канала $H_{i,j}$ для всех частотно-временных позиций (i, j) , на каждой из которых находится информационный символ $X_{i,j}$, по исходным данным в виде оценок наименьших квадратов коэффи-

циентов передаточной функции в позициях пилотных символов, рассчитываемых по (4).

Сравнение точности полученного алгоритма будем проводить с классическим методом оценки канала по критерию минимизации среднеквадратической ошибки, имеющего вид:

$$\hat{H}^{(MMSE)} = \underset{H, H_{i,j}^{(p)} \approx \hat{H}_{i,j}^{(LS,p)}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| \hat{H}^{(MMSE)} - H \right\|_2^2 \right\}.$$

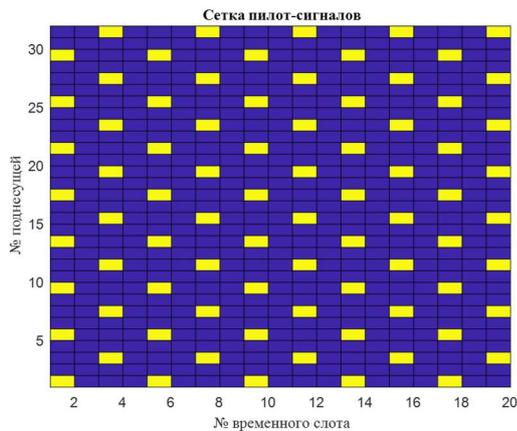
Соответствующая оценка имеет вид: $\hat{H}_{i,j}^{(MMSE)} =$

$$\operatorname{unvec} \left[R_{Y\tilde{Y}}^{-1} r_{Y\hat{H}_{i,j}^{(LS)}} \operatorname{vec} \left(\hat{H}^{(LS,p)} \right) \right], \quad \text{где } R_{Y\tilde{Y}}^{-1} = E \{ \operatorname{vec}(Y_{M \times N}) \operatorname{vec}(Y_{M \times N})^H \}, \quad r_{Y\hat{H}_{i,j}^{(LS)}} = E \{ \operatorname{vec}(Y_{M \times N}) \hat{H}_{i,j}^{(LS)} \}.$$

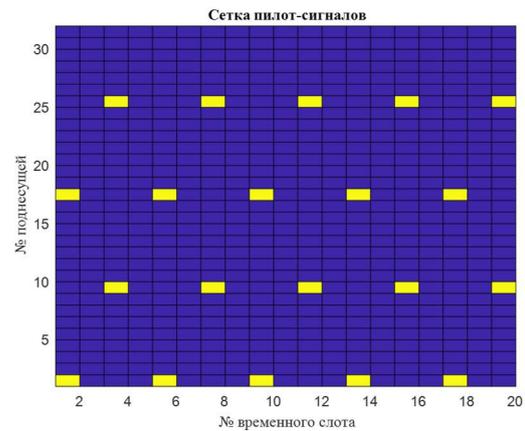
Среднеквадратическая ошибка оценки может быть рассчитана как: $\operatorname{MSE} \{ \hat{H}^{(MMSE)} \} = \operatorname{tr} \{ R_{HH} - R_{HY} R_Y R_{YH} \}.$

Описание условий моделирования и его результаты

Структура OFDM сигнала соответствует перспективным видам OFDM модемов ДКМВ диапазона с расположением пилотных символов на частотно-временной плоскости в виде гексагональной сетки (рис. 1). Число поднесущих OFDM сигнала $M = 32$ в полосе сигнала ТЧ (3100 Гц). Число временных слотов выбирается исходя из длительности оценки канала до 500 мс. В качестве пилотных символов используются сигналы с модуляцией 8PSK независимо от вида модуляции информационных символов.



а)



б)

Рис. 1. Образцы пилотной сетки с плотностью: а) 12.5%; б) 3.125%

Для моделирования использовались ДКМВ каналов, описываемые моделью Ваттерсона в соответствии рекомендацией ITU-R F.1487 [1] (формируемые стандартной функцией MATLAB `stdchan` с соответствующими па-

раметрами). Примеры спектрограмм частотно-временных матриц OFDM сигнала для некоторых моделей каналов изображены на рис. 2.

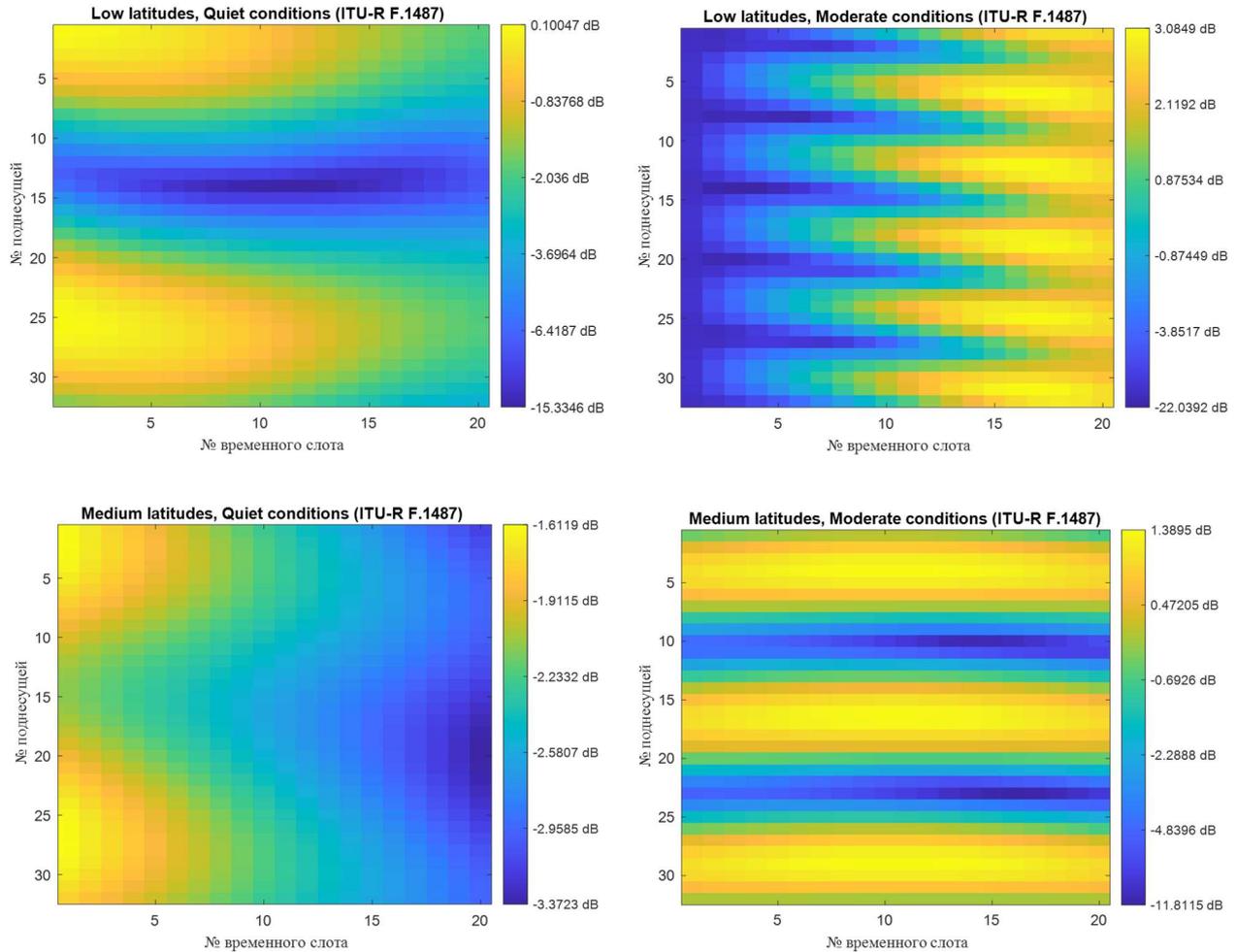


Рис. 2. Примеры реализаций передаточной функции для выбранной модели OFDM сигнала и при стандартных по ITU-R F.1487 моделях каналов

На рис. 3 представлены результаты моделирования предложенного алгоритма, в ходе которого оценивалась относительная ошибка оценки параметров канала, рассчитываемая

как: $RMSE = \sqrt{\frac{E\{|H-\hat{H}|^2\}}{E\{|H|^2\}}}$, в сравнении с алгоритмом на основе MMSE. При вычислении RMMSE учитывались только ошибки оценки в информационных позициях.

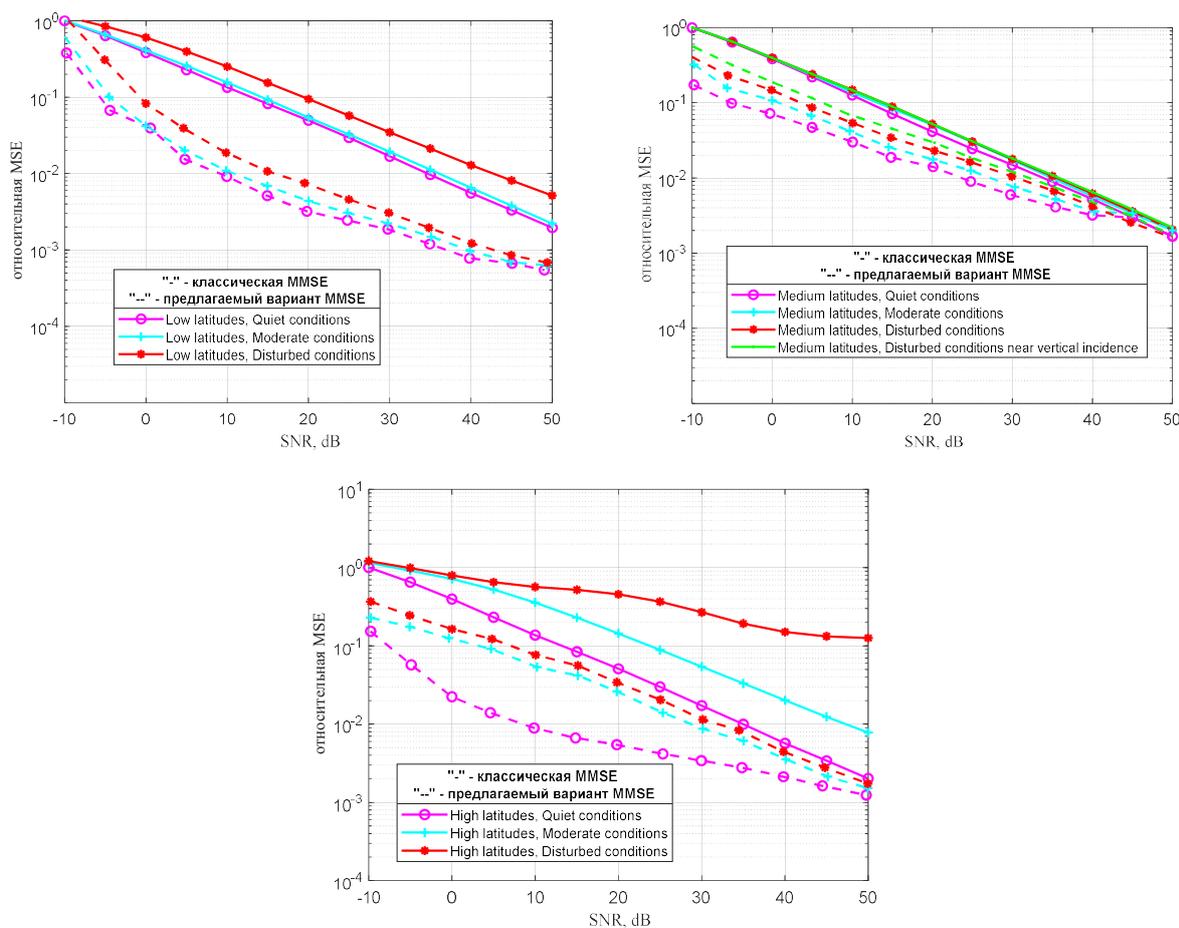


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка оценки коэффициентов передаточной функции канала (при различных его состояниях по ITU-R F.1487) в зависимости от величины отношения сигнал/шум для предлагаемого алгоритма в сравнении с эталонным

Гистограммы, характеризующие распределение ошибок, показаны на рис. 4.

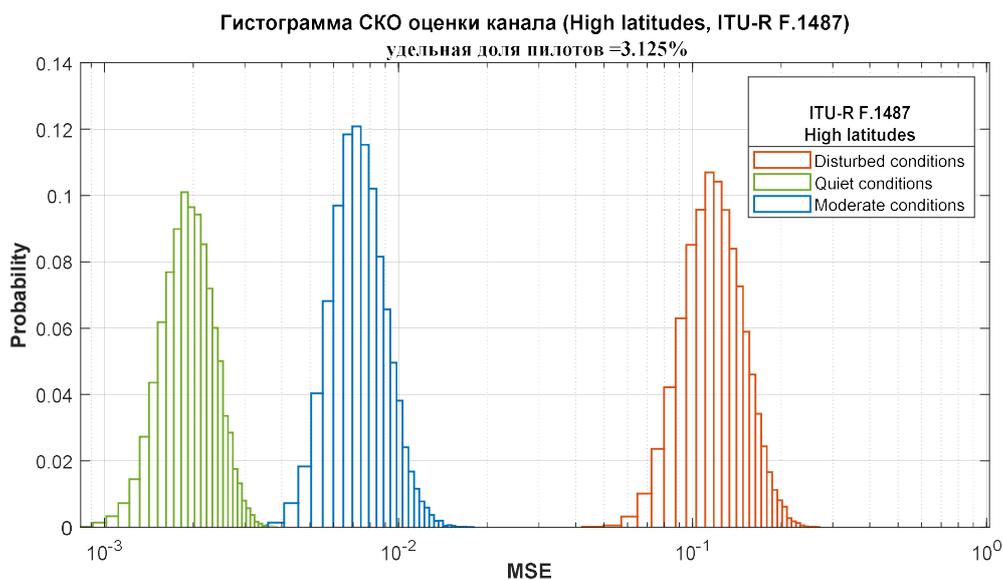


Рис. 4. Гистограмма распределения среднеквадратической ошибки оценки коэффициентов передачи канала при различных его состояниях согласно ITU-R F.1487

На рис. 5 изображены кривые требуемой точности оценки канала в зависимости от целевой величины вероятности ошибки (BER), используемого вида модуляции и её кратности при наличии только белого шума в канале. Кривые получены моделированием и построены

ны в диапазоне реально наблюдаемых величин отношения сигнал/шум в ДКМВ канале. На кривых, соответствующих низкой точности оценки, виден эффект неустраняемой ошибки, вызываемой исключительно неточностью оценки канала связи.

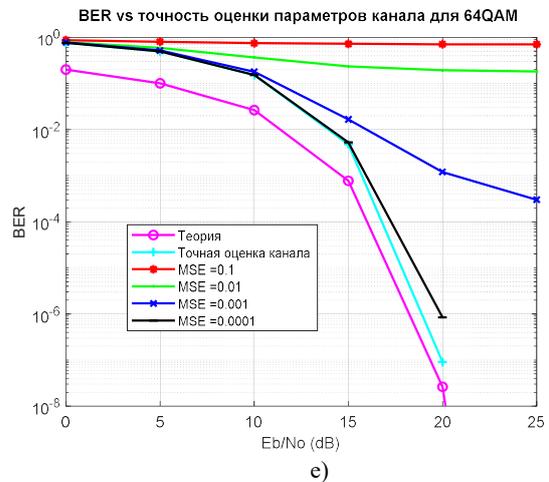
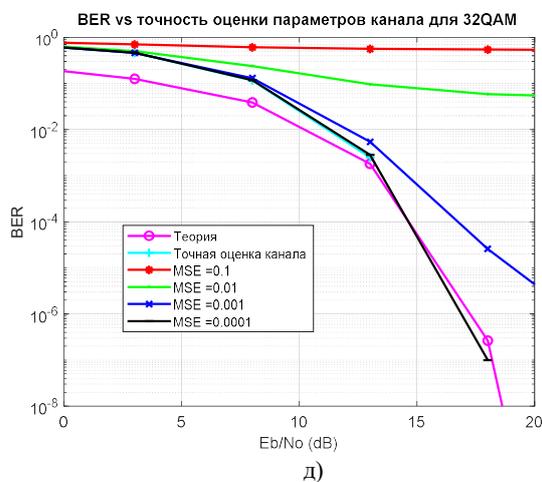
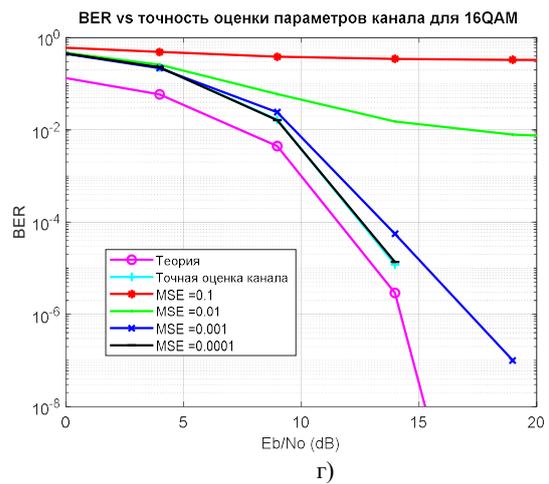
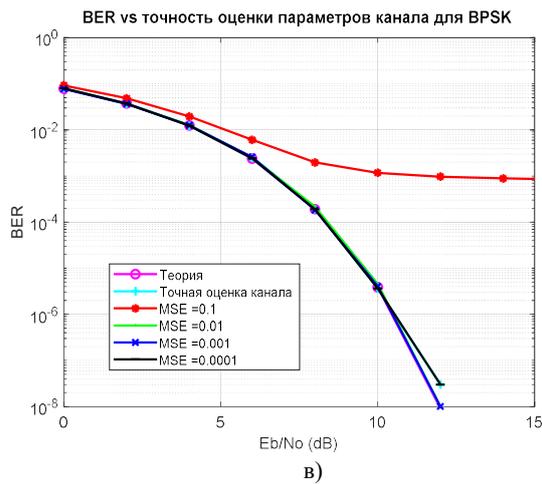
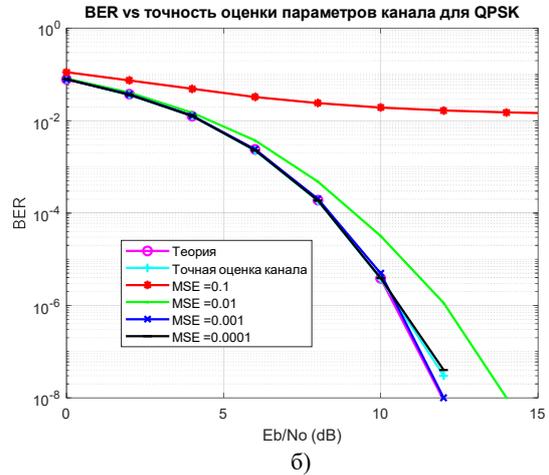
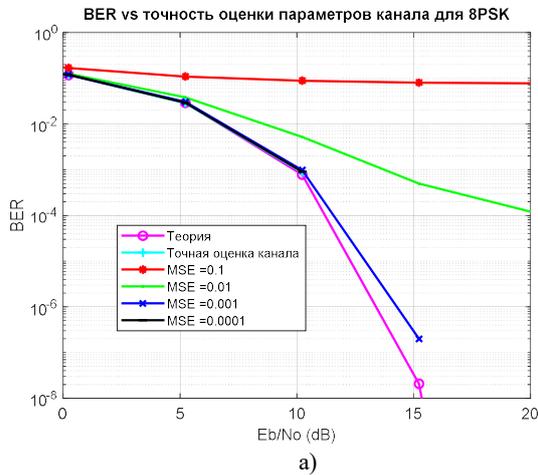


Рис. 5. Кривые помехоустойчивости (BER в зависимости от величины SNR) при разных величинах среднеквадратической ошибки оценки коэффициентов передаточной функции канала для различных видов модуляции: а) 8PSK; б) QPSK; в) BPSK; г) 16QAM; д) 32QAM; е) 64QAM

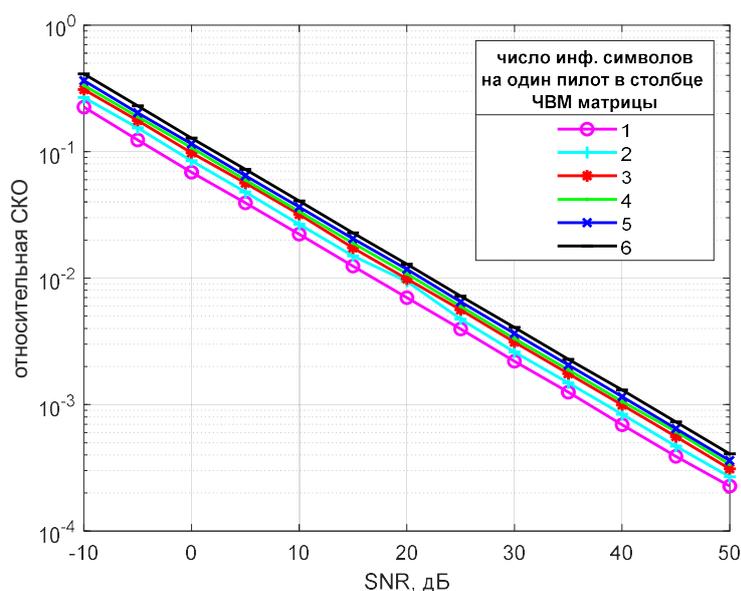


Рис. 6. Точность оценки коэффициентов передачи в «пилотном» столбце в зависимости от плотности пилотов

Сопоставление кривых помехоустойчивости при различных точностях оценки (BER от SNR, рис. 5) и кривых относительной ошибки оценки (RMSE от SNR), изображенных на рис. 3, показывает, что предлагаемый вид оценки канала в гораздо более широком диапазоне величин отношения сигнал/шум обеспечивает требуемую максимально допустимую величину BER, чем используемые для сравнения алгоритмы.

Выигрыш особенно заметен в каналах с высоким уровнем шума, большими межлучевыми задержками и высокой величиной доплеровского рассеяния. СКО оценки может уменьшаться более чем на порядок, что равносильно энергетическому выигрышу более 10 дБ. С другой стороны, предлагаемый алгоритм позволяет достичь той же точности оценки при меньшей удельной доле пилотных символов, что повышает скорость передачи полезной информации по каналу. Выигрыш тем выше, чем меньше количество лучей образует принимаемый сигнал, что объясняется повышением точности оценки при уменьшении числа оцениваемых параметров.

И анализа кривых на рис. 6 следует, что для предложенного метода оценки выгоднее увеличивать плотность сетки пилотов по времени, снижая её по частоте, что объясняется лучшей точностью восстановления передаточной функции по частоте за счёт учёта близкой к детерминированной зависимости передаточной функции от частоты.

Поскольку для сравнения был выбран алгоритм MMSE, построенный в предположении известной статистики канала, то выигрыш предлагаемого алгоритма по сравнению с аналогами, не учитывающими статистику канала (т.е. всеми вариантами алгоритмов, построенных на различных видах интерполяции), будет ещё большим.

Заключение

В настоящей работе предложен и исследован новый алгоритм оценки передаточной функции многолучевого канала в OFDM-системах, разработанный для случая заранее известного и постоянного во времени количества лучей с фиксированными задержками. Физической основой для постановки такой задачи послужила модель коротковолнового канала, для которого характерна квазидетерминированная структура многолучевого пространства, сохраняющаяся на протяжении десятков секунд. Ключевой идеей алгоритма является целенаправленное и полное использование этой априорной информации, что позволяет перейти от оценки всей совокупности коррелированных коэффициентов передаточной функции к оценке существенно меньшего числа некоррелированных весовых коэффициентов в подпространстве, базис которого однозначно определяется известными значениями задержек. Технически это реализовано за счёт синергии классического подхода с переходом

в область импульсной характеристики, процедуры понижения ранга корреляционной модели до числа физических лучей и применения оптимальной линейной оценки с минимальной среднеквадратической ошибкой в полученном сокращённом параметрическом пространстве.

Результаты проведённого математического моделирования с использованием стандартизованных моделей КВ-каналов убедительно подтверждают высокую эффективность предложенного метода. Продемонстрировано существенное снижение среднеквадратической ошибки оценки по сравнению не только с простыми интерполяционными схемами, но и с наиболее совершенным статистическим методом MMSE, который, хотя и использует знания о корреляционных свойствах канала, не налагает структурных ограничений, вытекающих из его физической модели. Полученный выигрыш в точности, эквивалентный энергетическому выигрышу в несколько децибел, непосредственно трансформируется в повышение качества и надёжности связи: для достижения заданного значения вероятности ошибки становится возможным работать при более низком отношении сигнал/шум либо, альтернативно, сократить служебные расходы на пилотные символы, увеличив тем самым полезную скорость передачи данных. Таким

образом, работа вносит вклад в развитие методов оценки канала, демонстрируя значительный потенциал от использования специфической априорной информации о его структуре. Предложенный алгоритм открывает практические пути для оптимизации и повышения эффективности систем связи, работающих в условиях каналов с квазистатической многолучевой структурой, к которым, в частности, относится важный класс систем КВ-диапазона.

Литература

1. Recommendation ITU-R: F.1487-0 (05/2000): Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1487-0-200005-I/en> (дата обращения: 01.11.2025).
2. Recommendation ITU-R: F.520: Use of high frequency ionospheric channel simulators URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.520/en> (дата обращения: 01.10.2025).
3. Qin B. A research on channel estimation algorithms for OFDM system // Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Big Data and Artificial Intelligence. 2020. pp. 15-19.
4. Dong X., Lu W., Soong A.C.K. Linear interpolation in pilot symbol assisted channel estimation for OFDM // IEEE Trans. Wireless Commun. May 2007. Vol. 6. No. 5. pp. 1910–1920.

Поступила 25.12.2025; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Малютин Александр Анатольевич – канд. техн. наук, ведущий инженер, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: malyutin.a.a@yandex.ru, SPIN-код: 9345-2602

Портниченко Михаил Дмитриевич – главный конструктор по системам связи специального назначения, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: portni4enkom@yandex.ru, SPIN-код: 4714-0145; Researcher ID: N-9899-2018

Зюзин Александр Николаевич – ведущий инженер, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: alexandrzyuzin9@gmail.com, SPIN-код: 1208-3868

Estimation of the channel parameters of the OFDM communication system with a predetermined number of beams and constant delays between them

A.A. Malyutin, M.D. Portnichenko, A.N. Zyuzin

JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK», Voronezh, Russia

Abstract. The paper solves the problem of high-precision estimation of channel parameters for orthonormal frequency division (OFDM) communication systems under conditions typical of the shortwave (KB/DCMV) band and other scenarios with a quasi-deterministic multipath structure. The main feature of the channel under consideration is a known and time-constant number of interfering rays, as well as fixed (unchanging) delay values between them. While the complex coefficients (amplitudes and phases) of these beams can vary randomly, knowledge of the static delay structure is valuable a priori information that is not fully used or not used at all by traditional statistical methods of channel estimation. A new algorithm is proposed that organically combines the transition from the frequency domain of estimation to the time domain with the procedure of lowering the rank of the correlation channel model to the number of physical rays. This approach makes it possible to significantly re-

duce the dimension of the estimated parametric space. Based on the obtained compact model, an effective estimate is constructed that combines the simplicity and robustness of the least squares method with the optimal properties of a linear MMSE estimate, but no longer applicable to all coefficients of the transfer function, but to a significantly smaller number of parameters that characterize the weighting coefficients for pre-calculated basic functions. These basic functions, which form the subspace of the signal, are uniquely determined by the known values of the interbeam delays, which is the key difference and source of potential benefits of the proposed method.

Key words: estimation of channel parameters by pilots; multipath communication channel; OFDM technology; DCMV channel; least squares estimation (OLS); estimation with minimum standard deviation (RMS)

References

1. Recommendation ITU-R: F.1487-0 (05/2000): Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators, available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1487-0-200005-I/en> (date of access: 01.11.2025).
2. Recommendation ITU-R: F.520: Use of high frequency ionospheric channel simulators, available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.520/en> (date of access: 01.10.2025).
3. Qin B. "A research on channel estimation algorithms for OFDM system", *Proc. of the 2020 2nd Int. Conf.: Big Data and Artificial Intelligence*, 2020. pp. 15-19.
4. Dong X., Lu W., Soong A.C.K. "Linear interpolation in pilot symbol assisted channel estimation for OFDM", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2007, vol. 6, no. 5, pp. 1910–1920.

Submitted 25.12.2025; revised 01.02.2026

Information about the authors

Aleksandr A. Malyutin, Cand. Sci. (Technical), Leading Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: malyutin.a.a@yandex.ru, SPIN-код: 9345-2602

Mikhail D. Portnichenko, Chief Designer for Special-Purpose Communication Systems, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: portni4enkom@yandex.ru, SPIN-код: 4714-0145; Researcher ID: N-9899-2018

Aleksandr N. Zyuzin, Lead Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: alexandrzyuzin9@gmail.com, SPIN-код: 1208-3868

Исследование рабочих характеристик аппаратных кодеров на базе различных микропроцессоров методом нагрузочного тестирования

А.Р. Рыжиков

Ярославский государственный университет им П.Г. Демидова, г. Ярославль, Россия

Аннотация. Разработка алгоритмов помехоустойчивого кодирования для защищённой передачи сигналов требует их всесторонней проверки на реальной аппаратной платформе, так как её характеристики напрямую влияют на итоговую производительность и надёжность. Недооценка аппаратных ограничений может свести на нет эффективность самого алгоритма, приводя к ошибкам, неисправимым на программном уровне. Разработан и реализован на микроконтроллерах алгоритм кодера, не требующий внешних фильтрующих цепей. Оценивается эффективность данного алгоритма (путем анализа его физических характеристик) и стабильности функционирования в условиях длительной эксплуатации с использованием различных микроконтроллеров. Практическая ценность выходит за рамки валидации конкретного алгоритма и заключается в создании универсальной методики и специализированного аппаратно-программного стенда для комплексного тестирования алгоритмов помехоустойчивого кодирования. Разработанный инструментарий позволяет проводить не только проверку логической корректности их работы, но и оценивать ключевые эксплуатационные параметры в условиях, максимально приближенных к критическим. Это включает в себя измерение реальной производительности, анализ энергопотребления и оценку устойчивости к длительным пиковым нагрузкам при работе на конкретной элементной базе. Экспериментальные результаты подтвердили работоспособность алгоритма, обеспечившего скорость передачи данных свыше 1 МБ/с. Сравнительный анализ на различных платформах выявил их пригодность для реализации предложенного решения. ESP32 показал наивысшую производительность, что делает его предпочтительным выбором для реализации конечного устройства с используемым алгоритмом. Инцидент с перегревом STM32 указал на критическую важность качества изготовления аппаратуры для надёжной работы. Наиболее показательным стал результат для RP2040: зафиксированное падение производительности при активации алгоритма кодирования количественно оценило его вычислительную сложность и повышенные требования к объёму оперативной памяти.

Ключевые слова: аппаратный; микроконтроллер; помехоустойчивость; фильтрация сигналов; защита данных

Введение

Эффективная реализация протоколов передачи данных, интегрирующих алгоритмы помехоустойчивого и криптографического кодирования, предъявляет комплексные требования к аппаратной платформе. Ключевым элементом, определяющим производительность и надёжность всей системы связи, выступает микроконтроллер, который должен обеспечивать не только высокоскоростной обмен данными, но и выполнение ресурсоемких сопутствующих алгоритмов [1]. Таким образом, задача реализации протокола напрямую трансформируется в задачу выбора или верификации микроконтроллера, способного предоставить достаточные вычислительные мощности, энергетический бюджет и устойчивость к внешним воздействиям. Как правило, такие системы используют концепцию Интернета вещей, облачных и периферических вычислений, передавая данные напрямую между внутренне-коммутированными устройствами [2].

Критически важными критериями выбора являются не только пиковая производительность, но и способность платформы обеспечивать минимальные и детерминированные задержки, а также устойчивость к электромагнитным помехам (ЭМП). Эти параметры напрямую влияют на качество связи и достигаемую скорость передачи данных, однако при реализации защищенных протоколов на первый план выходит новый конфликт: сложные алгоритмы шифрования создают значительную вычислительную нагрузку, что может приводить к непредсказуемым задержкам и снижению общей пропускной способности канала. Следовательно, перед интеграцией в конечное устройство необходима тщательная оценка способности целевого микроконтроллера выполнять алгоритмы кодирования и шифрования в реальном времени без нарушения временных характеристик протокола. Также необходимо было проверить скорость работы ранее разработанной модификации протокола AES, рассчитанного на работу в сложной информационной среде [2].

В современной практике проектирования встраиваемых систем для решения задач интернета вещей (IoT) широкое применение находят микроконтроллерные платформы на базе архитектур ESP32, STM32 и RP2040. Данные семейства микроконтроллеров занимают лидирующие позиции на рынке IoT-устройств благодаря оптимальному соотношению функциональных возможностей и экономической эффективности. Ключевыми факторами, определяющими их востребованность, являются наличие расширенного набора периферийных интерфейсов и доступная стоимость, не превышающая 1000 рублей за единицу изделия. Такая ценовая доступность обеспечивает экономическую целесообразность их массового внедрения в системы сбора, передачи и предварительной обработки данных, функционирующие в составе различных физических систем. Кроме того, низкая стоимость единицы оборудования минимизирует финансовые риски, связанные с заменой вышедших из строя компонентов в процессе эксплуатации. Каждое из рассматриваемых семейств обладает уникальными характеристиками, включающими архитектурные особенности, энергетические профили, конфигурацию периферийных блоков и программную экосистему, что обуславливает необходимость проведения детального сравнительного анализа для обоснованного выбора оптимальной платформы под конкретные задачи.

Целью данной работы является исследование возможностей реализации высокоскоростных протоколов передачи данных с интегрированными кодирующими алгоритмами на платформах ESP32, STM32 и RP2040 и оценка

их пригодности для обеспечения требуемого уровня защиты передаваемых данных. Исследование оценивает способность платформ выполнять эти задачи с использованием исключительно встроенных ресурсов, без привлечения дополнительных внешних средств обработки или экранирования, фокусируясь на компромиссе между производительностью, стабильностью и уровнем безопасности.

В процессе исследования и обработки результатов для всех перечисленных моделей микроконтроллеров, микроконтроллеры рассматривались исключительно в виде отчуждаемого модуля, напрямую поставляемого производителем без каких-либо конструктивных изменений.

Сравнение технических характеристик микроконтроллеров

Как было отмечено во введении, ключевыми критериями при выборе микроконтроллера для реализации аппаратных кодеров защищённой связи являются вычислительная мощность, устойчивость к электромагнитным помехам (ЭМП), способность обеспечивать детерминированные задержки передачи данных и энергетическая эффективность. Для проведения объективного сравнительного анализа семейств ESP32 [3], STM32 [4] и RP2040 [5] по этим критериям в табл. 1 систематизированы их основные технические характеристики. Эти данные служат фундаментом для последующей оценки производительности алгоритмов кодирования, уровня встроенной защиты от помех и общей надежности работы устройств на каждой из платформ.

Таблица 1

Технические характеристики анализируемых плат-микроконтроллеров

Характеристика	ESP32 (ESP32s3) [3]	STM32 (STM32F407VGT6) [4]	RP2040 [5]
Ядро процессора	Два ядра Xtensa LX6 (32-бит)	Одно ядро ARM Cortex-M4F (32-бит)	Два ядра ARM Cortex-M0+ (32-бит)
Тактовая частота	160 МГц (номин.), до 240 МГц	168 МГц (макс. для F4)	133 МГц (номин.)
Оперативная память (SRAM)	520 КБ (внутр.)	192 КБ (внутр.) + 64 КБ CCM RAM (F4)	264 КБ (внутр.)
Флэш-память	До 16 МБ (внеш. SPI)	До 1 МБ (внутр., F4)	До 16 МБ (внеш. QSPI)
Напряжение питания	2.3 В – 3.6 В	1.8 В – 3.6 В (F4)	1.8 В – 5.5 В (I/O), 3.3 В (ядро)
Рабочий диапазон температур	-40°C до +85°C (пром.) / +125°C (max)	-40°C до +85°C (пром.) / +105°C (max)	-20°C до +85°C (ком.) / +95°C (max)
Уникальные особенности	Интегрированные беспроводные интерфейсы	FPU (Cortex-M4F), криптографическое ускорение (AES, RNG),	Программируемые I/O (PIO) для реализации специализированных протоколов

Построение схемы исследования

Передача значительных объемов географических данных, таких как картографические тайлы, является типичным сценарием, требующим эффективной обработки крупных, но структурно простых массивов информации. Карты OpenStreetMap (OSM) [6] были выбраны в качестве источника данных в данной работе благодаря их детализации, открытой лицензии, активной поддержке сообщества и доступности через стандартизированный тайловый API [7]. Однако, как было установлено ранее, размещение полного набора данных OSM на целевом микроконтроллере оказалось невозможным из-за их объема памяти, превышающего доступные ресурсы памяти. Это ограничение обусловило архитектурное решение с использованием внешнего картографического сервера, хранящего данные и предоставляющего тайлы по запросу.

Доступ к внешнему серверу требовал организации стабильного сетевого соединения. Инициализация данного соединения столкнулась с необходимостью преодоления аппаратных ограничений микроконтроллера, в частности, недостатка выделенных сетевых интерфейсов и ограниченного числа GPIO. В данной работе был реализован программно-аппаратный метод с применением преобразователя интерфейса USB-Ethernet. Данный адаптер подключался интерфейсом USB к дискретным портам (GPIO) микроконтроллера, а интерфейс Ethernet – к сетевому разъему RJ-45 целевого устройства. Ввиду ограниченной доступности GPIO было принято решение использовать стандарт USB 2.0, требующий всего одной дифференциальной пары для передачи данных. Для обеспечения стабильной работы и предотвращения перебоев, связанных с питанием, модуль USB-Ethernet был подключен к независимому источнику питания. Схема реализации системы инициализации представлена рис. 1.

Одной из ключевых задач проекта являлась обработка и визуализация значительных объемов пространственных данных. Географические карты, как структурированный и относительно простой для алгоритмической обработки тип данных, были выбраны оптимальным решением для представления пространственной информации. Однако предварительные тесты передачи крупных датасетов выявили невозможность локального размещения полных наборов картографических данных на

целевом микроконтроллере из-за ограниченных ресурсов встроенной памяти; аналогичные ограничения наблюдались и на некоторых конфигурациях персональных компьютеров, особенно при работе со значительными географическими регионами.

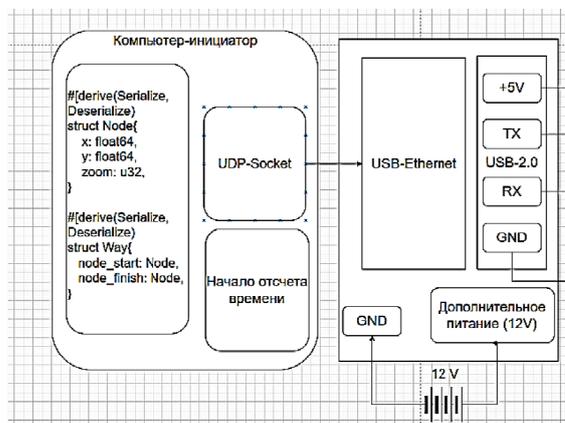


Рис. 1. Структуры отправки тестовых сообщений

Для решения проблемы хранения данных был выбран OpenStreetMap (OSM) как основной источник. Это решение обусловлено ключевыми преимуществами OSM: открытой лицензией, разрешающей свободное использование данных; высокой детализацией и актуальностью карт, поддерживаемых пользовательским сообществом; а также наличием стандартизированного тайлового API (<https://tile-server/zoom/x/y.png> [9]). Данный API обеспечивает простой доступ к фрагментам карты (тайлам) по координатам (x, y) и уровню масштабирования (zoom), структура его запросов визуализирована на рис. 2.

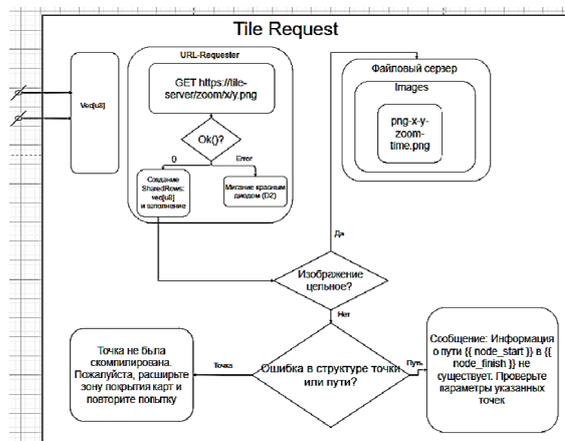


Рис. 2. Структура запроса к картам OpenStreetMaps

Архитектура системы реализована по принципу разделения функций:

- Внешний сервер выступает распределенным хранилищем и процессором данных OSM, обрабатывая ресурсоемкие задачи хранения полных карт и генерации тайлов по запросам.
- Микроконтроллерное устройство отвечает за формирование запросов на тайлы (на основе координат и масштаба), получение изображений по сети и их визуализацию.

Механизм получения тайлов включал три этапа. Сначала на основе текущего местоположения и масштаба вычислялся набор тайлов (x, y, zoom), покрывающих область интереса. Затем, для минимизации сложности управления сетью и буферами, применялся метод последовательного циклического перебора координат: алгоритм формировал HTTP GET-запросы к API OSM для каждого тайла в диапазоне. На этапе обработки ответа полученные PNG-изображения (png-x-y-zoom-time.png) буферизировались в оперативной памяти микроконтроллера и передавались на устройство хранения. Ошибки запросов фиксировались, а результат считался достоверным при уровне ошибок ниже 10 % от общего числа запросов.

Критическим требованием для работы схемы стала организация стабильного и производительного сетевого соединения между микроконтроллером и сервером OSM, способного выдержать интенсивный поток запросов на загрузку тайлов. Структура запроса представлена на рис. 2. В качестве основы запросов использовалась стандартный GET-запрос ввиду собственной скорости и факта присутствия функционала requests в стандартной прошивке для каждой из рассматриваемых плат-контроллеров.

Рис. 3 иллюстрирует схему экспериментальной установки для сравнительного анализа производительности и надежности передачи данных. Исходный поток тестовых данных разделяется на два параллельных тракта: тракт с аппаратным кодированием и защитой данных и тракт прямой (RAW) передачи данных без дополнительной обработки. Оба потока передаются через антенны. В ходе эксперимента фиксируются ключевые метрики: время передачи данных по каждому каналу и количество успешно переданных пакетов. Для каждо-

го тестируемого микроконтроллера (МК) измеряется общее время передачи, Полученные данные агрегируются в табл. 2. Напряжение питания системы стабилизировано на уровне +5 В.

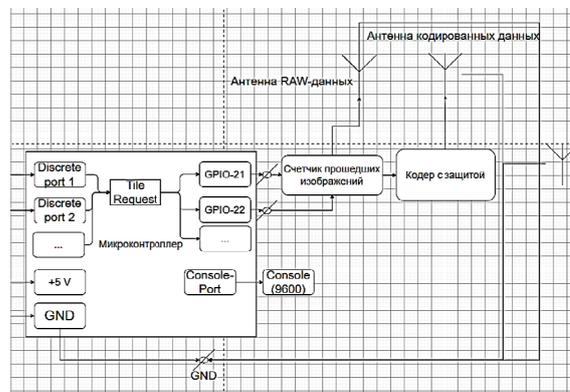


Рис. 3. Структурная схема системы отправки сообщений

Рис. 4 иллюстрирует схему работы приемного модуля, реализующего верификацию целостности данных. Принятый сигнал обрабатывается по двум альтернативным сценариям в зависимости от наличия заголовка известного помехоустойчивого кода. При обнаружении сигнатуры кода применяется соответствующий алгоритм декодирования для восстановления исходных данных и коррекции потенциальных ошибок. Данные без заголовка кода направляются напрямую в буфер (ByteArray) без дополнительной обработки.

Процедура верификации целостности данных включает этапы десериализации, контроля статуса и сравнения с эталоном. Данные из буфера (как декодированные, так и RAW) преобразуются в структурированный формат. В полученной структуре извлекается значение ключевого поля status, которое сравнивается с фиксированной эталонной строкой, заведомо установленной в рамках эксперимента. Передача признается успешной при совпадении значения поля статус с эталоном. В случае несовпадения передача фиксируется как ошибочная.

Данный метод обеспечивает объективную оценку эффективности помехоустойчивого кодирования путем сравнения уровня ошибок и скорости передачи данных в защищенном и прямом каналах передачи.

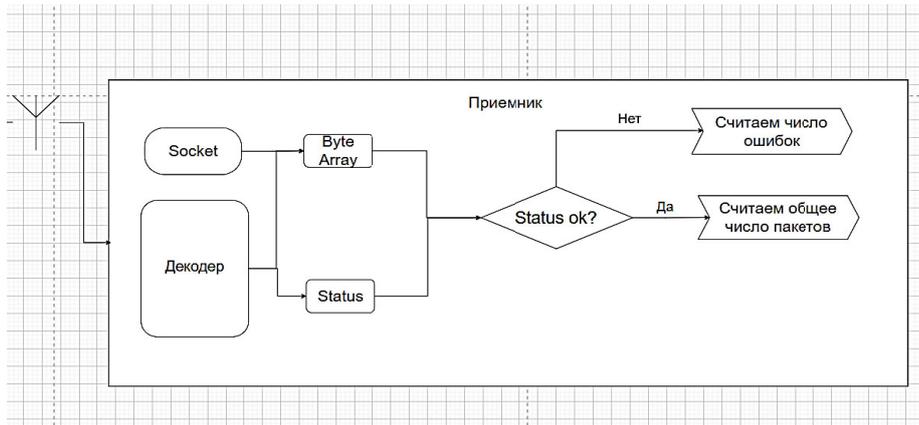


Рис. 4. Структурная схема приемника

Результаты исследования

Результаты замеров производительности приведены в табл. 2. Различия в объеме необходимых к передаче данных было вызвано тем, что карты данных перед отправкой требовали оптимизации под объем оперативной памяти и конфигурацию кеш-подсистемы конкретного микроконтроллера. Для каждого устройства формировался собственный набор блоков, упакованных с учётом допустимого размера

буфера, пропускной способности внутренней шины и особенностей работы периферии. В результате каждый микроконтроллер помещал в сокет строго тот объем информации, который мог быть обработан без фрагментации и без возникновения задержек при выборке данных из локальных буферов ввода-вывода. Это обеспечивало стабильность передачи и исключало переполнения в процессе обмена [10].

Таблица 2

Результаты нагрузочного тестирования

Микроконтроллер	ESP32	STM32	RP2040
Время, затраченное на обработку, с	207366	243352	269153
Объем данных, Гб	318	321	334
Скорость обработки данных, Мб/с	1,57	1,33	1,2
Время, затраченное на передачу данных по некодированному каналу, с	209346	209918	209991
Время, затраченное на передачу данных по кодированному каналу, с	218346	384121	356118
Средняя скорость передачи информации по некодированному каналу, Мб/с	1,558	1,551	1,550
Средняя скорость передачи информации по кодированному каналу, Мб/с	1,49	0,84	0,91
Процент успешно переданных тайлов, %	99,97	34,28	99,96

У RP2040 объем передаваемых данных оказался больше, чем у ESP32, из-за особенностей его архитектуры и организации внутренней памяти. В RP2040 отсутствует аппаратный кеш, а доступ к памяти SDRAM, подключённой внешне, имеет более предсказуемые, но менее оптимизированные задержки по сравнению с ESP32, у которого используется сложная кеш-иерархия и более агрессивные механизмы предварительной выборки. Поэтому RP2040 требуется передавать данные более крупными непрерывными блоками, чтобы компенсировать отсутствие кеша и минимизировать накладные расходы на многократные обращения к памяти. Дополнительно на объем передачи повлияла необходимость упаковывать структуры в формат, удобный для двух ядер

RP2040, работающих над буферизацией параллельно, в то время как ESP32 может распределять вычислительную нагрузку между ядрами, не увеличивая размер самого передаваемого блока.

Выводы

Проведенное исследование позволило получить следующие ключевые результаты:

Экспериментальные данные подтвердили достаточную производительность современных микроконтроллерных платформ для задач высокоскоростной передачи данных. Наблюдаемая средняя скорость передачи информации превышала 1 МБ/с, что близко к теоретическим пределам, рассчитанным на основе

спецификаций GPIO (44 Кбит/с на контакт при использовании 23 контактов [8]).

Сравнительный анализ выявил существенные различия в характеристиках исследуемых платформ:

1. ESP32 продемонстрировал наивысшую эффективность при операциях передачи данных, подтвердив статус оптимального решения для скоростных приложений. Учитывая требования алгоритма к хранению в оперативной памяти множества таблиц преобразования S-Vox объем оперативной памяти данного микроконтроллера с двумя ядрами Xtensa позволили заметно опередить конкурентов по скорости передачи данных как в режиме сырых данных, так и в режиме передачи кодированных сообщений. Также в случае увеличения числа ножек GPIO скорость может быть дополнительно увеличена.

2. STM32 столкнулся с критическим перегревом в процессе тестирования, приведшим к аппаратному отказу. Анализ показал, что причиной отказа стало расплавление припоя в зоне контакта процессора микроконтроллера с подложкой. Данный факт, потенциально оказался вызван несоответствием температуры плавления флюса заявленным характеристикам или производственным дефектом конкретного экземпляра. Данный инцидент прервал тестирование STM32, что отразилось на объеме полученных экспериментальных данных для этой платформы. На основе полученных данных в начале теста можно сказать, что по производительности данный микроконтроллер не уступает микроконтроллерам семейства ESP32 в производительности, однако, вероятность приобретения бракованных экземпляров на рынке микроконтроллерных устройств выше, чем для микроконтроллеров семейств ESP32 и RP2040.

3. RP2040 показал устойчивость к температурным нагрузкам, сопоставимую с STM32, однако с лучшей переносимостью термических перегрузок. При этом было зафиксировано снижение производительности платформы примерно на 42 % при активации алгоритмов защищенного кодирования в тракте передачи данных. Данный факт обусловлен меньшим объемом встроенной оперативной памяти, в

результате чего процессор микроконтроллера вынужден чаще обращаться к флеш-памяти, что вносит дополнительные задержки в обработку данных.

Различия в скорости передачи данных обусловлены различными аппаратными спецификациями рассматриваемых микроконтроллеров и различными производственными процессами при формировании конкретного экземпляра платы. В результате работы было установлено, что для задач кодирования, на момент рассмотрения работы, экземпляр микроконтроллера ESP32 подходит лучше аналогов.

Литература

1. Бойков К.М., Комадина О.С., Воинов Н.В. Разработка клиент-серверной архитектуры для сервиса по управлению интерактивными подписками // Современные технологии в теории и практике программирования: сборник материалов конференции; Dell Technologies; EPAM Systems. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 1-3.
2. Городецкий В.И., Пантелеев М.Г. Сети автономных агентов реального времени в среде с противодействием: особенности и компоненты модели // Информационные технологии в управлении: материалы конференции. СПб., 2020. С. 22–31.
3. Espressif Systems. ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC. Espressif product page, 2025. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (дата обращения: 15.11.2025).
4. STMicroelectronics. STM32F4 series of high-performance MCUs. STMicroelectronics product page, 2025. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html> (дата обращения: 15.11.2025).
5. Raspberry Pi Ltd. RP2040 Datasheet. Raspberry Pi Datasheet, 2025. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf> (дата обращения: 15.11.2025).
6. OpenStreetMaps Ltd. Download Tile Page. 2025. URL: <https://download.geo-fabrik.de/> (дата обращения: 15.11.2025).
7. OpenStreetMaps Ltd. API Documentation Page. 2025. URL: https://wiki.open-streetmap.org/wiki/RU:API_v0.6 (дата обращения: 15.11.2025).
8. Mosaic Documentation Web. GPIO Electrical Specifications. 2025. URL: <https://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/mic-rocontroller-projects/raspberry-pi/gpio-pin-electrical-specifications> (дата обращения: 15.11.2025).
9. GitHub. OpenStreetMaps documentation API for Android Smartphones. 2025. URL: <https://github.com/osmdroid/osmdroid/wiki> (дата обращения: 15.11.2025).
10. Орлов Г.А., Красов А.В., Гельфанд А.М. Использование технологий Big Data в анализе больших данных в компьютерных сетях // H&ES Research. 2020. Т. 12. № 4. С. 76-84. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84.

Поступила 29.12.2025; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Рыжиков Алексей Романович — аспирант, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова (150003, Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14), e-mail: alleshar@gmail.com

Investigation of the performance characteristics of hardware encoders based on various microprocessors by load testing

A.R. Ryzhikov

Yaroslavl State Demidov University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The development of noise-resistant coding algorithms for secure signal transmission requires their comprehensive verification on a real hardware platform, since its characteristics directly affect the final performance and reliability. Underestimating hardware limitations can negate the effectiveness of the algorithm itself, leading to errors that are incorrigible at the software level. As part of this work, an encoder algorithm was developed and implemented on microcontrollers that does not require external filtering circuits. The key objective of the work was to evaluate the effectiveness of this algorithm by analyzing its physical characteristics and stability of functioning under conditions of long-term operation using various microcontrollers. The practical value of the work carried out goes beyond the validation of a specific algorithm and consists in creating a universal methodology and a specialized hardware and software stand for comprehensive testing of noise-resistant coding algorithms. The developed toolkit allows not only checking the logical correctness of their work, but also evaluating key operational parameters in conditions as close as possible to critical ones. This includes measuring actual productivity, analyzing energy consumption, and evaluating resistance to prolonged peak loads when working on a specific element base. The experimental results confirmed the efficiency of the algorithm, which provided a data transfer rate of over 1 MB/s. A comparative analysis on various platforms revealed their suitability for the implementation of the proposed solution. The ESP32 showed the highest performance, which makes it the preferred choice for implementing an end device with the algorithm used. The STM32 overheating incident highlighted the critical importance of hardware manufacturing quality for reliable operation. The most significant result was for the RP2040: a recorded drop in performance when activating the encoding algorithm quantified its computational complexity and increased RAM requirements.

Key words: hardware encoder; microcontroller; noise immunity; signal filtering; data protection

References

1. Boykov K.M., Komadina O.S., Voinov N.V. "Development of client-server architecture for an interactive subscription management service," *Proc. of the Conf.: Modern Technologies in Theory and Practice of Programming (Sovremennye tekhnologii v teorii i praktike programmirovaniya)*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Dell Technologies; EPAM Systems, 2022, pp. 1–3.
2. Gorodetskiy V.I., Panteleev M.G. "Real-time autonomous agent networks in adversarial environments: features and model components," *Proc. of the Conf.: Information Technologies in Management (Informatsionnye tekhnologii v upravlenii)*, St. Petersburg, Russia, Oct. 6–8, 2020, pp. 22–31.
3. Espressif Systems. ESP32 WiFi & Bluetooth SoC. Espressif product page, available at: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (date of access: 08.11.2025).
4. STMicroelectronics. STM32F4 series of high performance MCUs. STMicroelectronics product page, available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html>, (date of access: 08.11.2025)
5. Raspberry Pi Ltd. RP2040 Datasheet. Raspberry Pi Datasheet, available at: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>, (date of access: 08.11.2025)
6. OpenStreetMaps Ltd. Download Tile Page, available at: <https://download.geofabrik.de/>, (date of access: 08.11.2025)
7. OpenStreetMaps Ltd. API Documentation Page, available at: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:API_v0.6, (date of access: 08.11.2025)
8. Mosaic Documentation Web. GPIO Electrical Specifications, available at: <https://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/raspberry-pi/gpio-pin-electrical-specifications>, (date of access: 08.11.2025)
9. Github. OpenStreetMaps documentation API for Android Smartphones, available at: <https://github.com/osmdroid/osmdroid/wiki>, (date of access: 08.11.2025)
10. Orlov G.A., Krasov A.V., Gelfand A.M. "The use of Big Data in the analysis of big data in computer networks", *H&ES Research*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 76-84.

Submitted 29.12.2025; revised 01.02.2026

Information about the author

Aleksey R. Ryzhikov, postgraduate student, Yaroslavl State Demidov University (14 Sovetskaya str., Yaroslavl 150003, Russia), e-mail: alleshart@gmail.com

Анализ характеристик антенных решеток разных конфигураций при реализации синфазного излучения

Е.А. Ищенко, Е.Д. Егорова, А.Ю. Чернышев, Ю.Г. Пастернак,
Д.К. Проскурин, И.А. Зеленин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматриваются характеристики антенных решеток с разной конфигурацией расположения излучателей при формировании синфазного равноамплитудного излучения. Рассматривались линейная, квадратная, треугольная, круговая антенные решетки (АР), а также решетки, построенные на основе математических функций и распределений Ферма, Архимеда и подсолнечника. Проведенное моделирование показывает, что использование линейной антенной решетки позволило сформировать веерное излучение с высоким уровнем коэффициента направленного действия (КНД). Использование других конфигураций позволяет получить более равномерную и симметричную картину излучения, при этом пиковые характеристики достигаются в антенных решетках, сформированных на основе математических функций Ферма, Архимеда и подсолнечника. Полученные результаты демонстрируются трёхмерными диаграммами направленности, а также зависимостями уровня коэффициента направленного действия, уровнем боковых лепестков, шириной главного лепестка от вида конфигурации антенных решеток. В роли единичного излучателя использовался простой планарный патч-излучатель, который позволил обеспечить оптимальное расстояние между антенными элементами для формирования антенной решетки. На основании полученных результатов можно отметить, что характеристики диаграмм направленности тесно связаны с конфигурацией антенных решеток, которые обеспечивают формирование направленного излучения.

Ключевые слова: антенная решетка; синфазная решетка; направленное излучение; диаграмма направленности; патч-антенна

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

Введение

Применение антенных решеток распространено в современных системах радиосвязи, радиолокации и радиопеленгации. Применение антенных решеток позволяет выполнять обнаружение объектов, а также, что наиболее важно – значительно повышать направленные свойства антенных систем. Применение антенных решеток позволяет обеспечить высокий уровень направленных свойств, малый уровень боковых лепестков, а также возможность отклонения лепестка при использовании устройств вращения и управления фазой [1]. Антенные решетки формируют высоконаправленное излучение при реализации синфазного возбуждения, однако свойства таких антенн тесно связано с формой антенной решетки, а также количеством излучателей [2, 3]. Особая задача при разработке антенных решеток заключается в реализации амплитудно-фазового распределения, которое позволит обеспечить отклонение главного лепестка в пространстве, чем обеспечивается про-

странственное сканирование лепестком [4]. При этом в некоторых задачах антенные решетки могут быть использованы для сканирования пространства, что позволяет реализовать полнопространственное обнаружение объектов, что особенно востребовано в задачах радиопеленгации [5], так как разнесенные антенные элементы в решетке позволяют обеспечить наиболее точные расчет характеристик падающих электромагнитных волн.

Для реализации запитывания антенных решеток могут быть использованы как многопортовые решения с фазовращателями, так и схемы на основе делителей, которые позволяют обеспечить синфазное возбуждение с высокой эффективностью [6, 7], однако стоит учитывать, что применение синфазного режима питания или режима питания с заранее сформированным амплитудно-фазовым распределением позволяет сформировать направленное излучение в одном – стационарном направлении без возможности отклонения главного лепестка. В процессе исследования будут рассматриваться антенные решетки, которые выполнены с разными конфигурациями схем излучения и работающими в синфазном равно-

амплитудном режиме. В роли излучателей были выбраны патч-антенны, которые позволяют обеспечить высокоэффективное излучение в узкой полосе частот, при этом сохранить малые размеры антенного элемента, что особенно важно при проектировании антенной решетки [8]. В процессе анализа рассматривались характеристики диаграмм направленности, которые получаются в зависимости от формы и расположения антенных элементов при реализации высоконаправленного излучения.

Моделирование конструкций антенных решеток в синфазном режиме

В процессе анализа рассматривалось семь основных конфигураций антенных решеток, которые формировались из равного количества антенных элементов – 49 штук, за исключением комбинации в форме треугольника (45 антенн) и круга (37 антенн), так как реализовать антенную решетку из 49 антенн в таком случае было невозможно. На рис. 1 приводится вид исследуемых конфигураций антенных решеток.

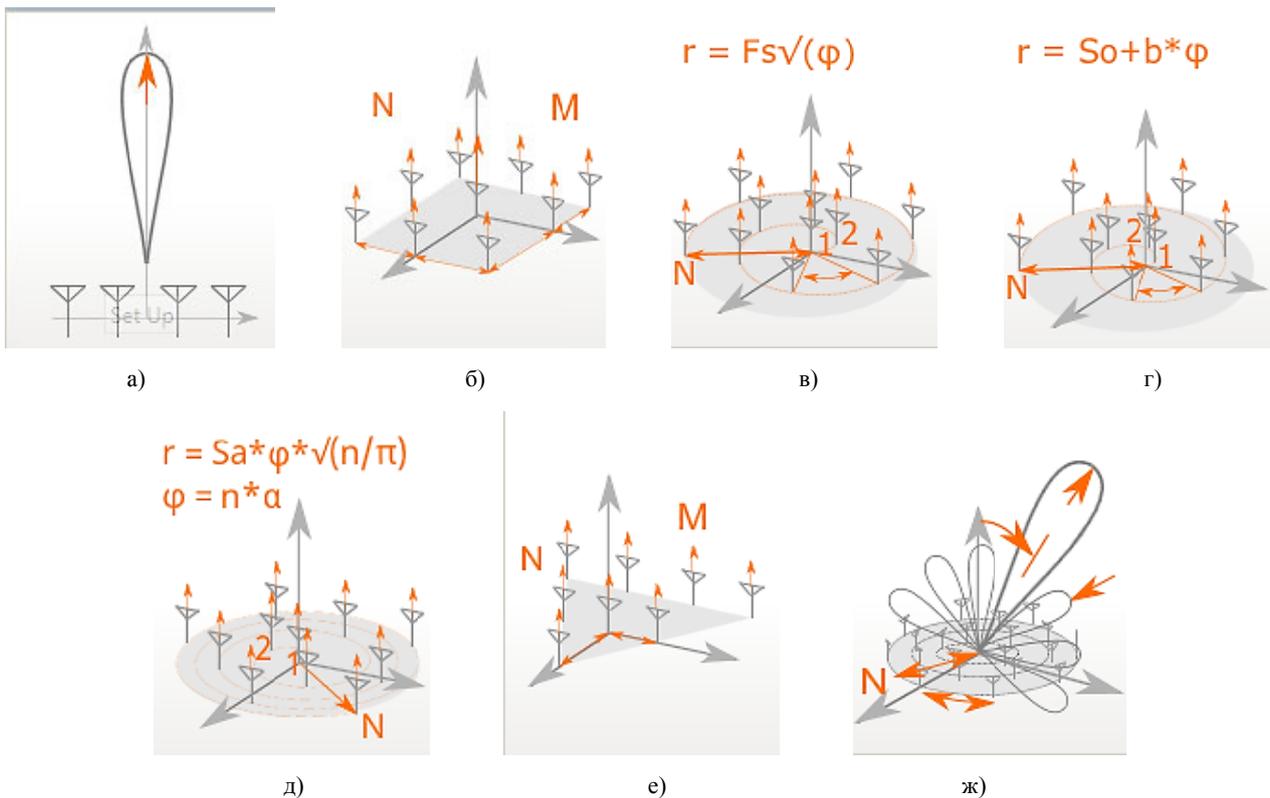


Рис. 1. Исследуемые конструкции антенных решеток: а) линейная антенная решетка (49 антенн); б) квадратная антенная решетка 7x7; в) расположение по закону Ферма (49 антенн); г) расположение по закону Архимеда (49 антенн); д) расположение по закону подсолнечника (49 антенн); е) треугольная антенная решетка (9x9 – 45 антенн); ж) круглая антенная решетка (37 антенн)

Выбранные конфигурации антенных решеток являются наиболее распространенными и часто встречающимися в конструкциях современных высоконаправленных систем связи. В процессе моделирования возбуждения все антенные элементы в решетке возбуждались в синфазном и равноамплитудном режимах.

Каждая антенная решетка представляет из себя геометрически упорядоченное по определенному закону расположение единичных антенн, так для линейной антенны была выбрана конфигурация из равноудаленных друг на друга антенных элементов с расстоянием 0.5λ ; аналогичное правило выбора расстояния по

осям x и y использовалось для квадратной антенной решетки. Особое внимание стоит уделить случаям, когда антенная решетка формировалась на основе сложных геометрических законов. В процессе анализа было выбрано три таких конструкции:

1) Расположение по закону Ферма, которое определяется выражениями:

$$r = Fs\sqrt{\varphi}$$

$$\varphi = n \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{180}$$

где коэффициент масштабирования Ферма $Fs = 0.25\lambda$, а $\alpha=137.5^\circ$.

2) Расположение по закону Архимеда:

$$r = S_0 + b\varphi,$$

$$b = \frac{S_l\pi}{2},$$

$$\varphi = n \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{180},$$

где коэффициенты расположения антенных элементов: $S_0 = 0.25\lambda$, $S_l = 0.15\lambda$, $\alpha=137.5^\circ$.

3) Расположение по закону подсолнечника:

$$r = S_a \cdot \varphi \cdot \sqrt{n/\pi},$$

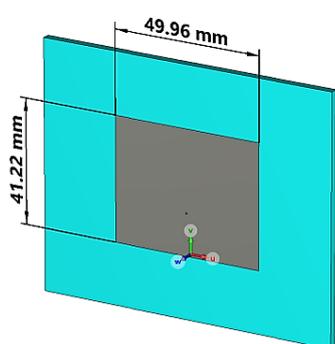
$$\varphi = n \cdot \beta,$$

$$\beta = \pi \cdot (3 - \sqrt{5})rad,$$

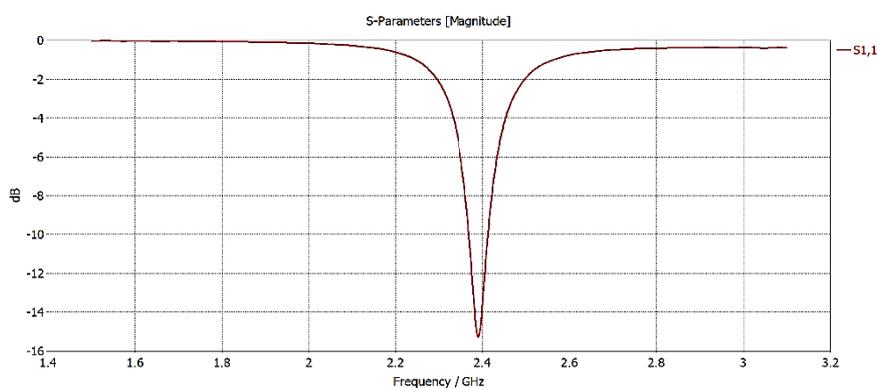
где коэффициенты в антенной решетке: $S_a = \lambda$.

Для треугольной решетки количество антенных элементов по высоте и основанию было выбрано одинаковым; круглая решетка формировалась на трех радиусах с межэлементным расстоянием в 0.5λ .

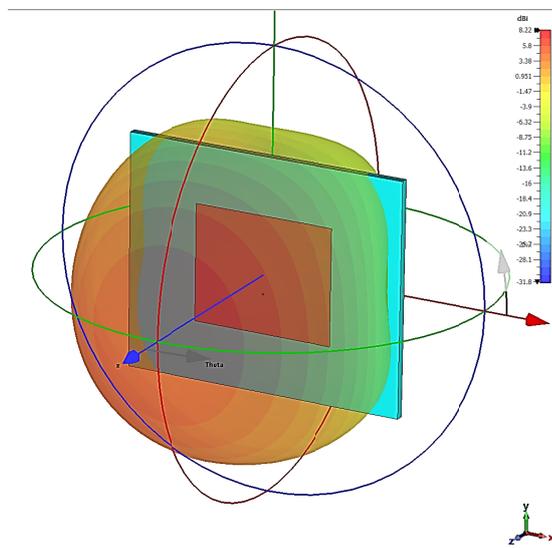
В роли базового антенного элемента рассматривался простейший патч-излучатель, который был предназначен для работы на частоте 2.4 ГГц. В роли диэлектрика выступал материал с $\epsilon_r = 2$ и толщиной 2.6 мм, запитывание выполнялось путем использования коаксиального зонда. Характеристики и вид антенного элемента приводятся на рис. 2.



а)



б)



в)

Рис. 2. Конструкция и характеристики единичного антенного элемента: а) вид антенного элемента; б) характеристики согласования; в) диаграмма направленности

Полученный антенный элемент имеет явный резонанс на частоте 2.4 ГГц, при этом формируется равномерная направленная диаграмма направленности с КНД 8.22 дБ. На основании приведенного антенного элемента были сформированы антенные решетки, которые возбуждались в синфазном и равноамплитуд-

ном режиме. На рис. 3 приводится вид диаграмм направленности, которые были получены в результате моделирования антенных решеток.

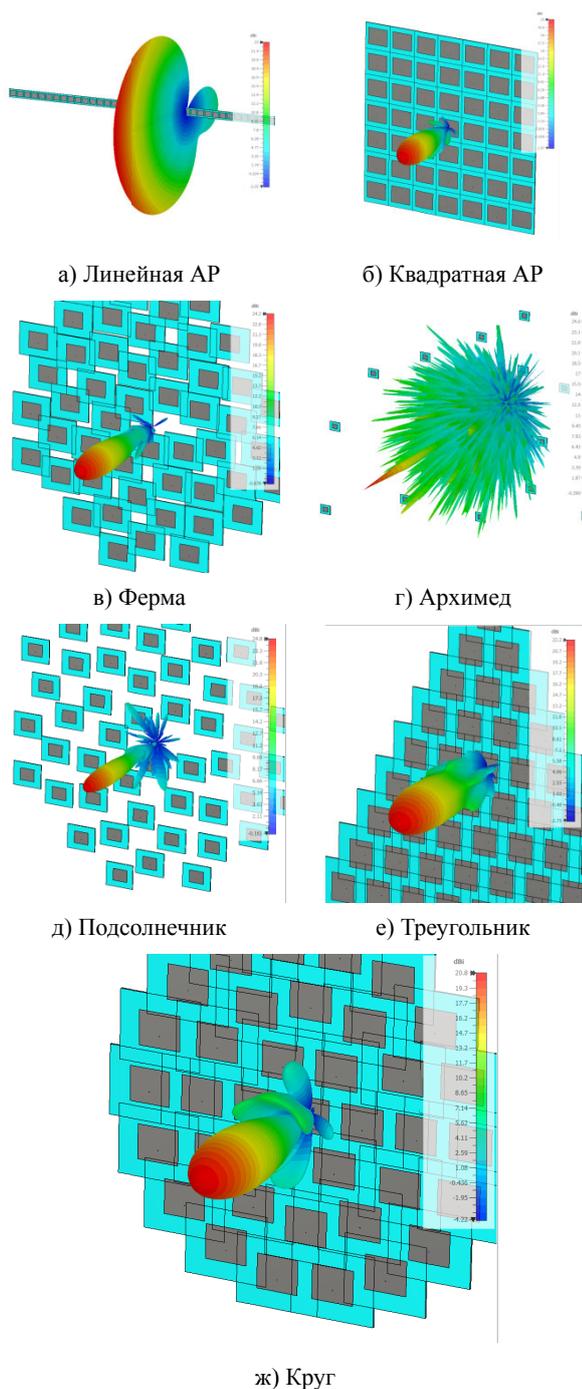


Рис. 3. Диаграммы направленности, сформированные антенными решетками с разными конфигурациями

Полученные результаты показывают, что применение антенных решеток с разной конфигурацией позволяет сформировать высоконаправленное излучение, при этом форма диаграмм направленности напрямую зависит от расположения излучателей. Наиболее равномерным и симметричным случаем является использование круговой и квадратной антенной решетки, при этом использование линейного расположения антенных элементов обес-

печивает формирование веерного излучения, что может быть использовано в специфических задачах обеспечения высоконаправленной эффективной связи. На рис. 4 приводятся зависимости основных характеристик диаграмм направленности при разной конфигурации антенных решеток (все результаты соответствуют частоте 2.4 ГГц).

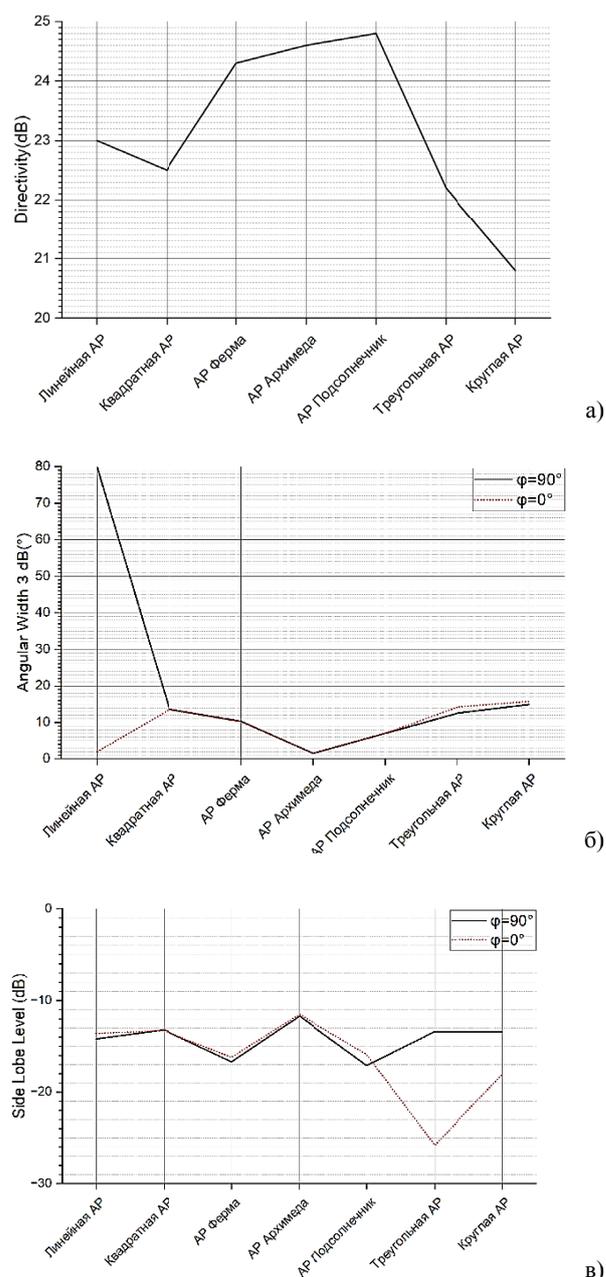


Рис. 4. Характеристики диаграмм направленности в зависимости от конфигурации антенной решетки: а) уровень КНД; б) ширина главного лепестка в основных плоскостях; в) уровень боковых лепестков

Полученные результаты показывают, что наибольший уровень направленного излучения наблюдается у сложных антенных решеток,

которые построены на основе математических функций Ферма, Архимеда и подсолнечника, однако размеры таких антенных решеток значительно превышают квадратную структуру. Использование же линейной антенной решетки позволило сформировать веерное излучение, которое обеспечивает узкий лепесток в одной плоскости и широкий в другой. Таким образом, можно отметить, что применение конфигураций антенных решеток тесно связано с задачей связи, которую требуется решить – обеспечить максимум КНД, минимизировать ширину главного лепестка или максимально подавить боковые лепестки.

Заключение

В данной работе были исследованы основные характеристики антенных решеток при реализации направленного синфазного и равноамплитудного излучения в пространстве. Рассмотренные конструкции антенных решеток показали, что конфигурация расположения антенных элементов оказывает непосредственное влияние на формируемый луч. Использование линейной антенной решетки обеспечивает формирование веерной диаграммы направленности, которая может быть эффективна в реализации систем связи с беспилотными летательными аппаратами, при этом использование других конфигураций позволяет обеспечить наиболее симметричные в главных плоскостях диаграммы направленности с малым уровнем боковых лепестков. Наибольшую эффективность показывают решения на основе математических функций Ферма, Архимеда и подсолнечника, однако размеры таких решеток

значительно превышают размеры квадратной и круглой антенной решетки.

Литература

1. Haupt R.L. Array Pattern Synthesis with Prescribed Nulls // 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). Waltham, MA, USA. 2019. pp. 1-4. DOI: 10.1109/PAST43306.2019.9021059.
2. 3D-printed conformal array antenna: Simulations and measurements / A.J. Fenn [et. al] // 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST). Waltham, MA, USA. 2016. pp. 1-4. DOI: 10.1109/ARRAY.2016.7832591.
3. Chou H.-T., Hung K.-L., Chou H.-H. Synthesis of microstrip antenna arrays for optimum near-field patterns via steepest decent method // 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, WA, USA. 2011. pp. 1723-1726. DOI: 10.1109/APS.2011.5996640.
4. Klionovski K., Shamim A., Sharawi M.S. 5G antenna array with wide-angle beam steering and dual linear polarizations // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA. 2017. pp. 1469-1470. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072777.
5. Rezazadeh N., Shafai L. A controlled reception pattern antenna array with dual-mode circular microstrip antenna elements for increased angular availability // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. May 2018. Vol. 66. No. 5. pp. 2594-2598. DOI: 10.1109/TAP.2018.2804619.
6. Dudek A., Gruszczynski S., Wincza K. Series-fed dual-polarized antenna arrays for single-layer photolithography fabrication // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Dec. 2024. Vol. 23. No. 12. pp. 4683-4687, DOI: 10.1109/LAWP.2024.3465792.
7. Sunflower array antenna with adjustable density taper / M.C. Viganó [et. al] // International Journal of Antennas and Propagation. Apr. 2009. 624035, 10 pages. DOI: 10.1155/2009/624035
8. Midasala V., Siddaiah P. (2016). Microstrip Patch Antenna Array Design to Improve Better Gains. Procedia Computer Science. 2016. Vol. 85, pp. 401-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.181>

Поступила 03.11.2025; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

Егорова Евгения Дмитриевна – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: evgenia_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103

Чернышев Антон Юрьевич – аспирант, старший преподаватель кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2031-5531

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, д-р техн. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru, ORCID: 0009-0004-0569-6737

Зеленин Иван Алексеевич – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: zia49zia@mail.ru

Analysis of the characteristics of antenna arrays of different configurations when implementing in-phase radiation

E.A. Ishchenko, E.D. Egorova, A.Yu. Chernyshev, Yu.G. Pasternak,
D.K. Proskurin, I.A. Zelenin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This article examines the characteristics of antenna arrays with different emitter configurations when generating in-phase equal-amplitude radiation. We considered linear, square, triangular, and circular antenna arrays (AA), as well as arrays based on mathematical functions and distributions such as Fermat, Archimedes, and sunflower. Modeling shows that the use of a linear antenna array allowed for the generation of fan-shaped radiation with a high directivity. Using other configurations allows for a more uniform and symmetrical radiation pattern, with peak performance achieved in antenna arrays based on the Fermat, Archimedes, and sunflower mathematical functions. We give the results by three-dimensional radiation patterns, as well as dependences of the directivity level, sidelobe level, and main lobe width on the antenna array configuration. We used a simple planar patch radiator as a single radiator, ensuring the optimal spacing between antenna elements to form the antenna array. Based on the obtained results, we can note that the characteristics of the radiation patterns are closely related to the antenna array configuration, which provides directional radiation.

Key words: antenna array; in-phase array; directional radiation; radiation pattern; patch antenna

Acknowledgements. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002).

References

1. Haupt R.L. "Array pattern synthesis with prescribed nulls", *2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2019, pp. 1-4.
2. Fenn A.J. et al. "3D-printed conformal array antenna: Simulations and measurements", *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2016, pp. 1-4.
3. Chou H.-T., Hung K.-L., Chou H.-H. "Synthesis of microstrip antenna arrays for optimum near-field patterns via steepest decent method", *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Spokane, WA, USA, 2011, pp. 1723-1726.
4. Klionovski K., Shamim A., Sharawi M.S. "5G antenna array with wide-angle beam steering and dual linear polarizations", *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1469-1470.
5. Rezaazadeh N., Shafai L. "A controlled reception pattern antenna array with dual-mode circular microstrip antenna elements for increased angular availability", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, May 2018, vol. 66, no. 5, pp. 2594-2598.
6. Dudek A., Gruszczynski S., Wincza K. "Series-fed dual-polarized antenna arrays for single-layer photolithography fabrication", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Dec. 2024, vol. 23, no. 12, pp. 4683-4687.
7. Viganó M.C. et al. "Sunflower array antenna with adjustable density taper", *International Journal of Antennas and Propagation*, Apr. 2009, 624035, 10 p.
8. Midasala V., Siddaiah P. "Microstrip patch antenna array design to improve better gains", *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 85, pp. 401-409.

Submitted 03.11.2025; revised 01.02.2026

Information about the authors

Evgeny A. Ishchenko, post-graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

Evgeniya D. Egorova, laboratory researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: evgenia_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103

Anton Yu. Chernyshev, post-graduate student, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2031-5531

Dmitry K. Proskurin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru, ORCID: 0009-0004-0569-6737

Ivan A. Zelenin, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zia49zia@mail.ru

Анализ гибридной радиооптической системы передачи с применением пространственно-временного кодирования

Р.П. Краснов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Атмосферные оптические линии связи, предоставляя возможность организации широкополосной связи на «последней миле», подвержены влиянию атмосферных условий передачи, ввиду чего требуется организация дополнительных мер по обеспечению высокого качества связи. В качестве таковых предложено совместное использование методов организации резервного радиоканала и пространственного разнесения оптических сигналов. Представлена система связи, включающая радиоканал, в котором применена техника пространственного разнесения, и оптический канал атмосферной связи, связанные между собой узлом ретрансляции, работающим по алгоритму «обнаружение и передача». Рассмотрено два алгоритма объединения разнесенных сигналов: выбор антенны с максимумом мощности и схема Аламоути. Влияние атмосферного радиоканала описывалось моделью рэлеевских замираний, а оптического канала – статистикой турбулентности, описываемой экспоненциальным законом Вейбулла. Были получены аналитические выражения для определения вероятности битовой ошибки и отказа системы, выполнено моделирование в среде MATLAB. Показано, что гибридная система повышает надежность связи, при этом на вероятности битовых ошибок и отказа выбор объединения радиосигналов оказывает незначительное влияние, поэтому предложен способ выбора антенны с максимумом мощности как более простой и имеющий меньшее энергопотребление в сравнении с пространственно-временным кодированием.

Ключевые слова: атмосферные оптические линии связи (АОЛС); радиооптическая система; распределение Вейбулла; вероятность ошибки; вероятность отказа; схема Аламоути

Введение

Для удовлетворения растущей потребности на высокоскоростную связь в случаях, когда развертывание полноценной волоконно-оптической системы передачи экономически невыгодно, отличным решением является применение инфраструктуры на базе атмосферных оптических линий связи (АОЛС). Передача данных в таком случае осуществляется через атмосферный канал с помощью оптического пучка, что представляет более перспективную альтернативу радиосвязи. Такая линия является более широкополосной, устойчивой к электромагнитным помехам, не требует лицензии, а также обладает лучшей безопасностью, поскольку использует узконаправленные пучки. Более того, АОЛС обеспечивает быстрое развертывание и настройку [1].

Поскольку АОЛС позволяет осуществлять связь на проблематичном участке «последней мили» с небольшими трудозатратами, АОЛС является кандидатом для поддержки беспроводных сетей следующего поколения 5G и 6G, а также во многих прочих высокоскоростных приложениях, таких как связь с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), кроссовая

связь в центрах обработки данных, спутниковая связь, а также временные каналы, развертываемые в связи с чрезвычайными происшествиями, военными действиями, резервные каналы при связи при крупных авариях на магистральных линиях.

Несмотря на все перечисленные перспективы, широкому внедрению технологии АОЛС препятствует целый набор технических проблем. В наземных каналах имеется существенная зависимость от метеоусловий приема, особенно от таких атмосферных явлений, как дождь, туман, плотный снег. Даже в ясную погоду к снижению пропускной способности может приводить атмосферная турбулентность. Кроме того, с ростом расстояния между приемопередатчиками все больший вклад начинает вносить необходимость точного наведения, здесь к ухудшению качества приема могут приводить смещения под влиянием ветра и даже тепловые сдвиги зданий. Для решения этих проблем требуется разработка новых и улучшение существующих технологий обеспечения надежной работы АОЛС.

Одним из эффективных способов борьбы с влиянием атмосферы на качество передаваемых данных является построение гибридных линий связи, в которых оптическая система передачи данных комбинируется с радиочастотной. При

такой реализации возможно два подхода к построению: последовательная или параллельная [2].

При выборе последовательной структуры система транслирует данные по радиочастотному или оптическому каналу, выбор канала определяется коммутатором или ретранслятором. Применение ретрансляторов помогает реализовать методы кооперативного разнесения, широко применяемые, например, в системах сотовой связи [3]. При этом можно получить повышение пропускной способности системы.

При выборе параллельной структуры оптические и радиочастотные каналы одновременно параллельно и передают данные либо в канале прямой видимости, либо с использованием ретрансляторов.

Ретрансляторы, используемые в подобной топологии систем связи, различаются по способу обработки сигналов. Ретранслятор с алгоритмом «усиление и передача» (УП) наиболее востребован по причине простой структуры и реализации, а также низкой стоимости [3]. Коэффициент усиления при этом может быть как фиксированным, так и изменяться в зависимости от состояния канала. К недостатку ретрансляторов типа УП можно отнести то, что наряду с полезным сигналом также значительно усиливается шум, поэтому в некоторых случаях более предпочтителен алгоритм «обнаружение и передача» (ОП) или «декодирование и передача» (ДП) [4]. В ретрансляторе с алгоритмом работы типа ОП принимаемый сигнал поступает на приемник-обнаружитель и затем транслируется далее в канал. В ретрансляторе с алгоритмом ДП происходит детектирование (обычно мягкое), для каждого принятого символа определяется логарифмическое отношение правдоподобия и уже затем происходит дальнейшая передача в канал.

Хорошие результаты по повышению надежности передачи дают методы разнесенных передачи и/или приема, а также помехоустойчивого кодирования. Можно также использовать их комбинацию - пространственно-временное блочное кодирование (ПВБК). При использовании ПВБК приемник получает набор различных копий передаваемых сигналов на несколько приемных антенн и комбинирует их по выбранному алгоритму, что повышает пропускную способность и качество передачи в целом. Самым простым, а потому наиболее распространенным среди различных методов ПВБК является схема, основанная на методе Аламоути.

При этом, в отличие от традиционной реализации для радиоканалов, возможно объединение изложенных выше методик повышения качества связи, то есть реализация гибридной радиолоптоической системы связи с различными схемами пространственного разнесения.

Можно применять также простую схему пространственного разнесения с несколькими антеннами на передающей (MISO), приемной (SIMO) стороне, а также их объединение (MIMO) без помехоустойчивого кодирования. При этом также будет улучшаться качество связи, но несколько менее эффективно [5].

Постановка задачи

Наиболее простой для реализации передачи оптических сигналов является модуляция интенсивности в сочетании с некогерентным приемником (МИ/НП). Порог обнаружения может быть как фиксированным, так и регулироваться в зависимости от условий приема, главным образом от атмосферной турбулентности.

Поскольку такая реализация требует схемы с обратной связью для получения информации о состоянии канала, более простым методом будет формирование сигналов позиционно-импульсной модуляции (ПИМ), при этом для приема адаптивный порог обнаружения не требуется. Исходя из аналогичных соображений применяют также модуляцию интенсивности поднесущей, которая, несмотря на некоторое усложнение схемы приемопередатчиков, обладает более высокой спектральной эффективностью [6].

На рис. 1 представлена блок-схема предлагаемой гибридной радиолоптоической системы передачи.

Источник данных подключается к ретранслятору по радиочастотному каналу, в получатель связывается с этим ретранслятором посредством оптического пучка. Для передачи данных по радиоканалу предложено использовать два метода организации разнесённой передачи: алгоритм выбора антенны с наибольшим уровнем принимаемого сигнала и алгоритм на основе ПВБК по методу Аламоути. Соответствующий декодер располагается на стороне ретранслятора, работающего по алгоритму ОП. Далее следует преобразование обнаруженного декодированного радиосигнала в оптический и последующая передача его в канал АОЛС. Для этого в радиосигнал добавляется постоянное смещение, поскольку передача оптических сигналов отрицательной поляризации невозможна.

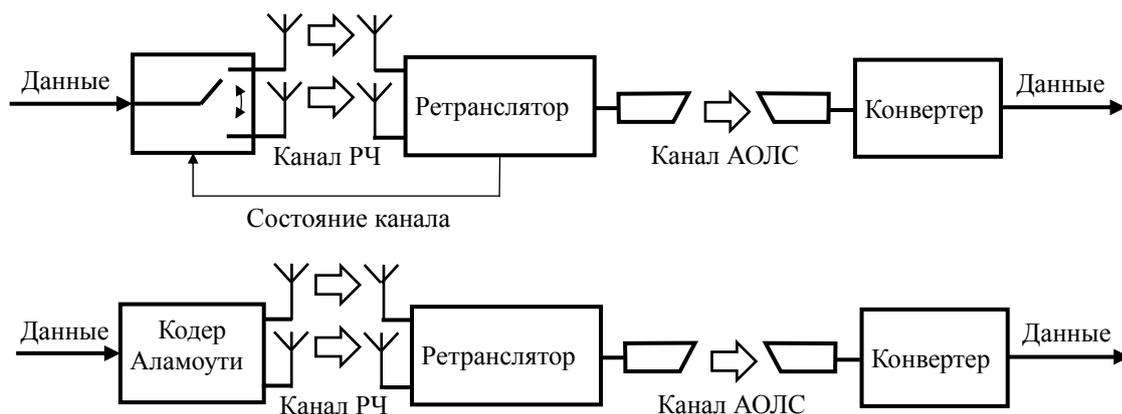


Рис. 1. Структурная схема гибридной радиооптической системы

Далее рассмотрим алгоритм разнесения радиосигналов по схеме Аламути. Представим кодовую матрицу Аламути в виде [7]

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где x_1, x_2 – символы в первом и втором последовательных временных интервалах передачи кода Аламути [7], $*$ – операция комплексного сопряжения.

Формируемые кодером символы транслируются через канал с рэлеевскими замираниями.

Тогда сигналы, поступающие на вход ретранслятора, в соответствующей паре временных окон примут вид:

$$\begin{bmatrix} z_{1,1} \\ z_{1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 h_1 + x_2 h_2 + N_{1,1} \\ -x_2^* h_1 + x_1^* h_2 + N_{1,2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где h_1, h_2 – коэффициенты передачи радиоканала, $N_{1,1}$ и $N_{1,2}$ – компоненты, показывающие влияние аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Будем считать, что интервалы передачи данных малы по сравнению со скоростью изменения h_1 и h_2 , полагая их неизменными величинами на каждом временном окне.

Выполнив сопряжение с $z_{1,2}$ и умножение на матрицу канала вида

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix}$$

выражение (2) примет вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{1,2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_{1,1} h_1^* + z_{1,2}^* h_2 \\ z_{1,1} h_2^* + z_{1,2}^* h_1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_1 + n_{1,1} \\ (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_2 + n_{1,2} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где r_1, r_2 – принимаемый ретранслятором сигнал, $n_{1,1} = N_{1,1} h_1^* + N_{1,2}^* h_2$ и $n_{1,2} = N_{1,1} h_2^* + N_{1,2}^* h_1$ – АБГШ с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2(|h_1|^2 + |h_2|^2)$ [8].

Приемник ретранслятора обнаруживает радиочастотный сигнал s_1 , конвертирует его в оптический с квантовой эффективностью ξ и добавляет к нему постоянное смещение, амплитуду которого для простоты будем считать единичной. Тогда оптический сигнал на выходе ретранслятора можно описать как:

$$x_{рч} = \xi s_1 + 1.$$

Принятый сигнал АОЛС после преобразования примет следующий вид:

$$r_{АОЛС} = I \xi s_1 + n_{АОЛС},$$

где I – коэффициент передачи, $n_{АОЛС}$ – шум в оптической линии.

Обозначим отношение сигнал/шум на входе оптического приемника как: $\gamma_{АОЛС} = \bar{\gamma}_{АОЛС} i_{\phi\delta}^2$, где $\bar{\gamma}_{АОЛС}$ – среднее отношение сигнал/шум, $i_{\phi\delta}$ – фототок оптического детектора.

Модель канала

Статистике турбулентного атмосферного оптического канала подходит экспоненциаль-

ное распределение Вейбулла как наиболее близкое к экспериментальным результатам для всех видов турбулентности. Плотность вероятности и функция распределения случайного процесса, определяющего атмосферную турбулентность, зададим формулами (4) и (5) соответственно [9]:

$$P_{AOLC}(\gamma_{AOLC}) = \frac{\alpha\beta}{2\bar{\gamma}_{AOLC}\eta^\beta} \left[\frac{\gamma_{AOLC}}{\bar{\gamma}_{AOLC}} \right]^{\beta-2} \times \quad (4)$$

$$\times \exp \left[- \left(\frac{\gamma_{AOLC}}{\bar{\gamma}_{AOLC}\eta^2} \right)^\beta \right] \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma_{AOLC}}{\bar{\gamma}_{AOLC}\eta^2} \right)^\beta \right] \right)^{\alpha-1},$$

$$P_\gamma(\gamma) = \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{AOLC}\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right)^\alpha. \quad (5)$$

где α и β – параметры формы, η – масштабный параметр, связанный со средним значением оптической интенсивности.

В приведённых выше соотношениях параметр формы β равен [9]:

$$\beta = 1,012(\alpha\sigma_R^2)^{-13/25} + 0,142, \quad (6)$$

где $\sigma_R^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} d^{11/6}$ – дисперсия Рытова, а параметр формы α задается как [9]

$$\alpha = 3,931 \left(\frac{D}{\rho_0} \right)^{-0,519}, \quad (7)$$

где $\rho = (1,46C_n^2 k_0^2 L)^{-3/5}$ – радиус когерентности, D – диаметр апертуры оптического приемника, C_n^2 – структурная константа турбулентности, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, L – протяженность оптической линии связи.

Параметр η определяется согласно [9] как:

$$\eta = \frac{1}{\alpha\Gamma(1+1/\beta)g(\alpha,\beta)}, \quad (8)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция, а

$$g(\alpha,\beta) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (i+1)^{-\frac{1-\beta}{\beta}} \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha-i)}. \quad (9)$$

Статистику замираний в радиоканале будем описывать законом Рэлея. Функция плотности вероятности такого процесса равна:

$$P_{Pq}(\gamma) = 1 - \exp \left(- \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{Pq}} \right), \quad (10)$$

Отношение сигнал/шум на входе ретранслятора

$$\gamma_{Pq} = \bar{\gamma}_{Pq} |h_1|^2 + \bar{\gamma}_{Pq} |h_2|^2 = \gamma_{1Pq} + \gamma_{2Pq}, \quad (11)$$

где $\bar{\gamma}_{Pq} = m\{x^2\}/\sigma^2$ – среднее значение отношения сигнал/шум на входе ретранслятора, $m\{\}$ – символ операции математического ожидания.

Для нахождения функции распределения воспользуемся преобразованием Лапласа от функции плотности вероятности (10). Распространяя упомянутое выше утверждение о том, что скорость изменения состояния канала много ниже скорости изменения передаваемых сигналов и на радиодиапазон, предположим, что радиолинии независимы и подчиняются одинаковым законам распределения. Тогда, после преобразования Лапласа и интегрирования, функция распределения вероятностей для статистики радиочастотной линии примет вид:

$$P_{Pq}(\gamma) = 1 - \left[1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{Pq}} \right] \exp \left(- \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{Pq}} \right). \quad (12)$$

При использовании схемы, показанной на рис. 1, передатчик источника данных выбирает антенну в соответствии с полученной от ретранслятора информацией. В свою очередь ретранслятор выбирает сигнал, который имеет максимальное отношение сигнал/шум, математически такая операция представляется следующим образом:

$$\gamma_{Pq} = \max(\gamma_{Pq1}, \gamma_{Pq2}), \quad (13)$$

где γ_{Pqi} – мгновенное отношение сигнал/шум радиоканала на входе ретранслятора от i -й передающей антенны. Считая сигналы с разных антенн независимыми и одинаково распределенными, получим:

$$P_{Pq} = P[\max(\gamma_{Pq1}, \gamma_{Pq2}) \leq \gamma] = P_{Pq1}(\gamma)P_{Pq2}(\gamma) = \left(1 - \exp \left[- \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{Pq}} \right] \right)^2. \quad (14)$$

Модель системы

Состояние отказа системы передачи в целом может наступать из-за того, что в радио- или оптическом канале отношение сигнал/шум опустится ниже определенного критического значения $\gamma_{нор}$. Считая процессы в каналах независимыми, вероятность такого события можно описать как [10]:

$$P_{омк}(\gamma_{нор}) = 1 - [1 - P_{рч}(\gamma_{нор})] [1 - P_{АОЛС}(\gamma_{нор})] = P_{рч}(\gamma_{нор}) + P_{АОЛС}(\gamma_{нор}) [1 - P_{рч}(\gamma_{нор})], \quad (15)$$

где $P_{рч}(\gamma_{нор})$ и описываются соотношениями (12) (без использования ПВБК) или (14) (с использованием ПВБК), а $P_{АОЛС}(\gamma_{нор})$ определяется согласно (5).

Для системы без применения ПВБК в радиоканале вероятность отказа можно определить, подставив (5) и (12) в (15):

$$P_{омк}(\gamma_{нор}) = 1 - \left\{ \left[1 + \frac{\gamma_{нор}}{\gamma_{рч}} \right] \exp\left(-\frac{\gamma_{нор}}{\gamma_{рч}}\right) \right\} \times \left\{ 1 - \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{\gamma_{нор}}{\bar{\gamma}_{АОЛС} \mathcal{N}^2}\right)^{\beta/2}\right] \right]^{\alpha} \right\}. \quad (16)$$

В случае же системы с ПВБК, подставляя (5) и (14) в (15), получаем:

$$P_{омк}(\gamma_{нор}) = 1 - \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{нор}}{\gamma_{рч}}\right) \right\}^2 \times \left\{ 1 - \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{\gamma_{нор}}{\bar{\gamma}_{АОЛС} \mathcal{N}^2}\right)^{\beta/2}\right] \right]^{\alpha} \right\}. \quad (17)$$

Определим $P_e(\gamma)$ – вероятность битовой ошибки системы MPSK в канале с аддитивным белым гауссовским шумом как [11]

$$P_e(\gamma) = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma} \sin[\pi/M] \sqrt{\log_2 M}) \cdot (18)$$

Для BPSK – модуляции (18) принимает вид:

$$P_e(\gamma) = \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) = Q(\sqrt{2\gamma}). \quad (19)$$

При некогерентном детектировании и применении цифровой модуляции типа BPSK,

вероятность ошибки приема в общем виде можно описать как:

$$P_{ои}(\gamma) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_e(\gamma) P_{омк}(\gamma) d\gamma. \quad (20)$$

Для вычисления интеграла (20) может быть использовано разложение в ряд, используя соотношение [12]

$$\int_0^{\infty} x^{\beta} e^{-x} f(x) dx = \sum_{i=1}^n H_i f(x_i),$$

описывающее квадратурную формулу Лагерра – Гаусса. Применяя такое соотношение к выражению (20), получим

$$P_{ои}(\gamma) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_e(\gamma) P_{омк}(\gamma) d\gamma = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_{омк}(\gamma) dP_e(\gamma) = (21) \\ = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \gamma^{-1/2} e^{-\gamma} P_{омк}(\gamma) d\gamma \approx \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n H_i P_{омк}(\gamma_i).$$

где γ_i – i -й корень обобщенного многочлена Лагерра $L_m^{(-1/2)}(\gamma)$, а весовой коэффициент H_i вычисляется согласно [12]:

$$H_i = \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \gamma_i}{m!(m+1)^2 \left[L_{m+1}^{(-1/2)}(\gamma_i)\right]^2}.$$

Теперь, подставляя (16) и (17) в (21), получаем выражение для определения битовой ошибки системы без ПВБК и с ПВБК соответственно.

Результаты моделирования

Далее предполагается, что в оптическом канале на качество связи влияет в основном атмосферная турбулентность, меняющаяся от слабой до сильной. В радиоканале основной вклад в снижение качества связи вносят рэлеевские замирания. Также будем считать, что среднее отношение сигнал/шум оптического и радиоканала одинаково. Для простоты также примем $\xi = 1$.

Величину атмосферной турбулентности будем определять величиной дисперсии σ_R^2 : примем $\sigma_R^2 = 0,5$ для слабой, $\sigma_R^2 = 1,5$ для средней и $\sigma_R^2 = 3,5$ для сильной турбулентности соответственно [13]. Структурная константа тур-

булентности $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ для слабой, $C_n^2 = 2,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ для средней и $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ для сильной турбулентности соответственно [13].

Протяженности радиоканала и оптического канала связи $L = 800 \text{ м}$, диаметры передающей и приемной апертур равны 20 см каждая, рабочая длина волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$.

На рис. 2 показаны графики вероятности битовой ошибки в функции отношения сигнал/шум для слабой, умеренной и сильной турбулентности. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что в представленной системе характеристики качества связи для различных режимов передачи в радиоканале весьма схожи. Разница же в поведении системы при различных видах атмосферной турбулентности начинает проявляться при среднем отношении сигнал/шум более 12 дБ.

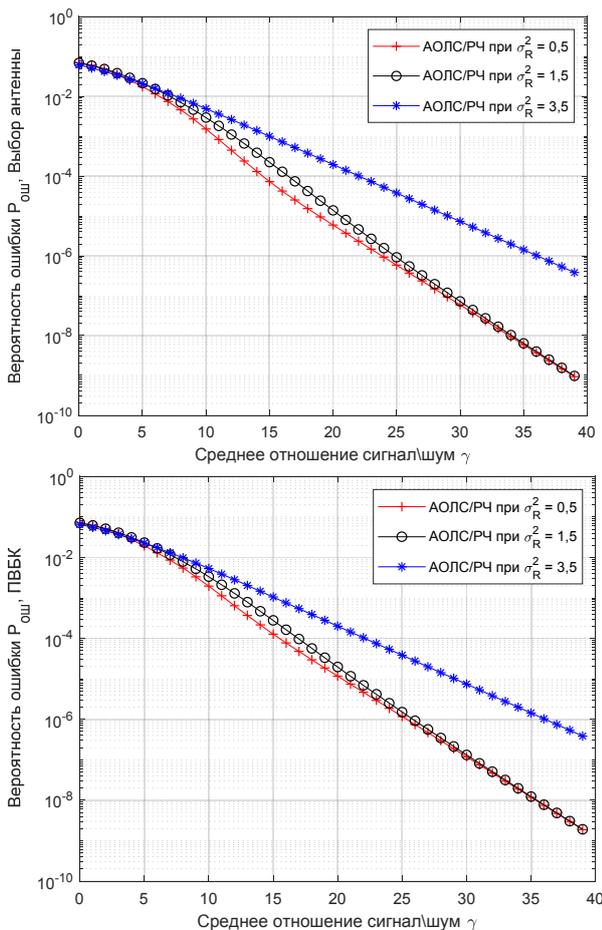


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки

Хотя с точки зрения помехоустойчивости обе системы показывают схожие результаты, организация радиоканала с алгоритмом выбора

антенны с наибольшей мощностью отличается большей простотой и меньшим энергопотреблением.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности отказа для схем выбора антенны с максимумом мощности и ПВБК от среднего отношения сигнал/шум для трех уровней атмосферной турбулентности: слабой, умеренной и сильной при величине порогового уровня $\gamma_{пор} = 3 \text{ дБ}$. Здесь также обе реализации радиоканала демонстрируют незначительную разницу в качестве связи.

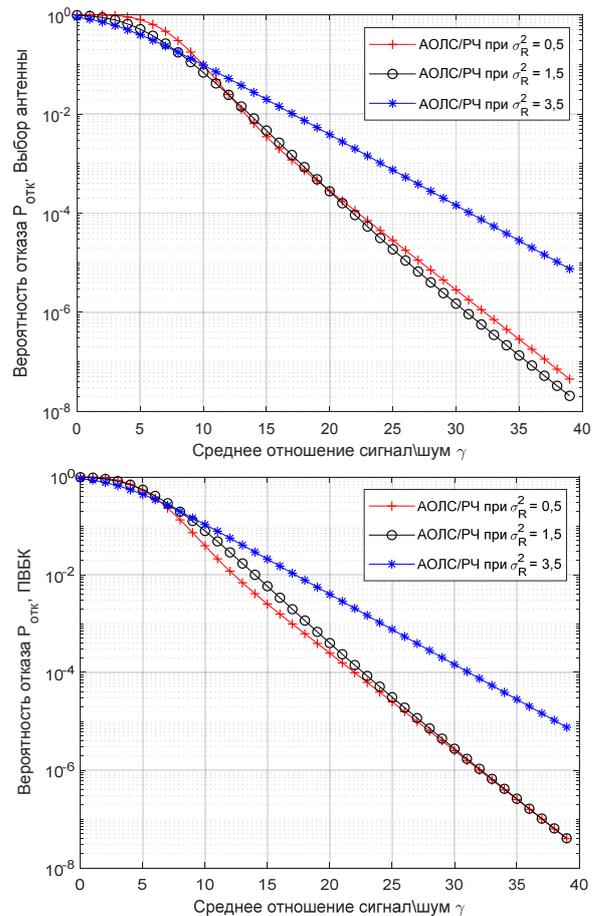
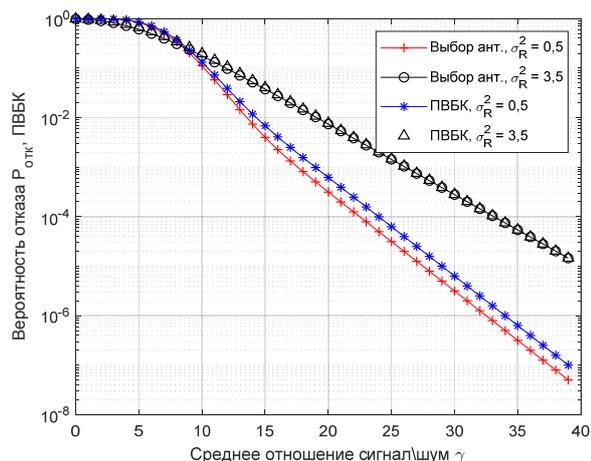


Рис. 3. Вероятность отказа $\gamma_{пор} = 3 \text{ дБ}$

На рис. 4 представлена зависимость вероятности отказа от среднего отношении сигнал/шум для различных уровней атмосферной турбулентности при пороговом уровне $\gamma_{пор} = 5 \text{ дБ}$.

Здесь также можно наблюдать, что качество связи практически не зависит от типа объединения разнесенных радиосигналов.

Рис. 4. Вероятность отказа при $\gamma_{пор} = 5$ дБ

Заключение

В статье рассмотрен вариант построения гибридной радиооптической системы связи, образованной радиоканалом с пространственным разнесением и ретранслятором, выполняющим взаимное преобразование электрических и оптических сигналов. В качестве методов разнесения рассмотрены два алгоритма: более простой – выбор антенны с максимальной мощностью и более сложный кодер Аламути в ПВБК.

Получены аналитические выражения для определения вероятности отказа и битовой ошибки для рэлеевского канала с замираниями на РЧ и экспоненциального распределения Вейбулла в турбулентном оптическом канале. Полученные соотношения использовались для проведения компьютерного моделирования в среде MATLAB. Из представленных результатов можно заметить, что на качество связи представленной системы выбор метода разнесения радиосигнала влияет незначительно. Поэтому сделан вывод о перспективности выбора более простого алгоритма выбора антенны с максимумом мощности.

Поступила 25.12.2025; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторе

Краснов Роман Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rkrasnov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4065-4557

Влияние атмосферной турбулентности при низких отношениях сигнал/шум практически не сказывается на качестве связи, поэтому такая система может эффективно работать при условиях эксплуатации на линиях с часто меняющейся атмосферной турбулентностью.

Литература

1. Willebrand H., Ghuman B. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002. 259 p.
2. Performance Analysis of Multihop Parallel Free-Space Optical Systems Over Exponentiated Weibull Fading Channels / P. Wang [et al.] // IEEE Photonics Journal. Feb. 2015. Vol. 7. No 1. pp. 1-17.
3. Bhatnagar M.R. Average BER analysis of relay selection based decode-and-forward cooperative communication over Gamma-Gamma fading FSO links // Proc. IEEE ICC. Budapest. Hungary. Jun. 2013. pp. 3142-3147.
4. Amirabadi M.A., Vakili V.T. Performance analysis of a novel hybrid FSO/RF communication system // IET Optoelectronics. 2020. Vol. 14. Issue 2. pp. 66-74.
5. El-Mashade M.B., Aly M.H., Toeima A.H. Performance Evaluation of FSO System with MIMO Technique in Different Operating Environments // Physical Science International Journal. Vol. 7(1). May 2015. pp. 33-48.
6. Andrews L., Phillips R., Hopen C. Laser Beam Scintillation With Applications. New York: SPIE Press, 2001. 416 p.
7. Alamouti S.M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications // IEEE Journal of Selected Areas in communications. 1998. Vol. 16. Issue 8. pp. 1451-1458.
8. Bhatnagar M.R., Anees S. On the Performance of Alamouti Scheme in Gamma-Gamma FSO Links with Errors Pointing Fading // IEEE Wireless Communications Letters, 2015. Vol. 4. Issue 1. pp. 94-97.
9. Yura H., Rose T. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment // Opt. Express. 2012. Vol. 20. No. 18. pp. 20680-20683.
10. Outage Performance of Multi-Hop Hybrid FSO / RF Communication Systems / H. Kazemi [et al.] // 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IOWO), 2015, pp. 83–87.
11. M-PSK and M-QAM BER computation using signal-space concepts / J. Lu [et al.] // IEEE Transactions on Communications. 1999. Vol. 47. Issue 2. pp. 181-184.
12. Tables for the evaluation of $x^\beta e^{-x} f(x) dx$ by Gauss-Laguerre quadrature / P. Concus [et al.] // Math. Comput. Oct. 1963. Vol. 17. No. 83. pp. 245-256.
13. Bouchet O., Sizun H., Boisrobert C., Fornel F., Favennec P.-H. Free-Space Optics: Propagation and Communication GET and Lavoisier. 2004. 219 p.

Analysis of a hybrid radio-optical transmission system using spatial-time coding

R.P. Krasnov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Free space optical communication lines, while providing the opportunity for broadband communications over the "last mile," are susceptible to atmospheric transmission conditions, requiring additional measures to ensure high communication quality. A proposed approach is to combine methods for establishing a backup radio channel and spatial diversity of optical signals. This paper examines a communication system comprising a radio channel employing spatial diversity technology and an atmospheric optical channel, interconnected by a relay node operating using the "detect and transmit" algorithm. Two algorithms for combining diversity signals are considered: antenna selection and the Alamouti scheme. The effect of the atmospheric radio channel is described by a Rayleigh fading model, while the optical channel is described by turbulence statistics described by the Weibull exponential law. Analytical expressions for determining the bit error rate and system outage are derived, and simulations are performed in MATLAB. It is shown that the hybrid system improves communication reliability, while the choice of radio signal combining has little impact on the probability of errors and outage. Therefore, a method for selecting an antenna with maximum power is proposed as simpler and more energy efficient than space-time coding.

Key words: free space optics (FSO); radio-optical system; Weibull distribution; error probability; outage probability; Alamouti scheme

References

1. Willebrand H., Ghuman B. "Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks", Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002, 259 p.
2. Wang P. et al. "Performance Analysis of Multihop parallel free-space optical systems over exponentiated Weibull fading channels", *IEEE Photonics Journal*, Feb. 2015, vol. 7, no 1, pp. 1-17.
3. Bhatnagar M.R. "Average BER analysis of relay selection based decode-and-forward cooperative communication over Gamma-Gamma fading FSO links", *Proc. IEEE ICC*, Budapest. Hungary. Jun. 2013, pp. 3142-3147.
4. Amirabadi M.A., Vakili V.T. "Performance analysis of a novel hybrid FSO/RF communication system", *IET Optoelectronics*, 2020, vol. 14, issue 2, pp. 66-74.
5. El-Mashade M.B., Aly M.H., Toeima A.H. "Performance evaluation of FSO system with MIMO technique in different operating environments", *Physical Science International Journal*, May 2015, vol. 7(1), pp. 33-48.
6. Andrews L., Phillips R., Hopen C. "Laser beam scintillation with applications", New York: SPIE Press, 2001, 416 p.
7. Alamouti S.M. "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE Journal of Selected Areas in communications*, 1998, vol. 16, issue 8, pp. 1451-1458.
8. Bhatnagar M.R., Anees S. "On the performance of Alamouti scheme in Gamma-Gamma FSO links with errors pointing fading", *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, vol. 4, issue 1. pp. 94-97.
9. Yura H., Rose T. "Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment", *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 18, pp. 20680-20683.
10. Kazemi H. et al. "Outage performance of Multi-Hop hybrid FSO/RF communication systems", *4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2015, pp. 83-87.
11. Lu J. et al. "M-PSK and M-QAM BER computation using signal-space concepts", *IEEE Transactions on Communications*, 1999, vol. 47, issue 2, pp. 181-184.
12. Concus P. et al. "Tables for the evaluation of $x^\beta e^{-x} f(x) dx$ by Gauss-Laguerre quadrature", *Math. Comput.*, Oct. 1963., vol. 17, no. 83, pp. 245-256.
13. Bouchet O., Sizun H., Boisrobert C., Fornel F., Favennec P.-H. "Free-space optics: propagation and communication GET and Lavoisier", 2004, 219 p.

Submitted 25.12.2025; revised 01.02.2026

Information about the author

Roman P. Krasnov, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-Irtiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4065-4557

Итеративный алгоритм полуслепой оценки многоантенного (MIMO) канала связи

А.А. Малютин, М.Д. Портниченко, А.Н. Зюзин

АО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Предложен итеративный алгоритм полуслепой оценки параметров канала для многоантенных (MIMO) систем, базирующийся на классическом WR-методе (разложение на обесляющую матрицу и матрицу вращения). Суть усовершенствования заключается в совместном циклическом уточнении обеих матриц — обесляющей и вращения — в рамках единого итерационного процесса, совмещенного с демодуляцией полезного сигнала. Это позволяет адаптивно учитывать изменяющиеся статистические свойства помехи, в частности, её пространственную корреляцию, что критически важно для диапазона декаметровых и коротких волн (ДКМВ), где внешние коррелированные помехи часто доминируют над внутренним шумом. Алгоритм предусматривает также возможность расширения опорной (пилотной) последовательности за счёт наиболее надёжных оценок информационных символов, полученных на предыдущей итерации, что повышает эффективность использования данных. Результаты численного моделирования для систем 2x4 и 4x8 MIMO с различными схемами модуляции и кодирования демонстрируют значительное преимущество предложенного метода по сравнению с аналогами. Обеспечивается энергетический выигрыш до 1.5–4 дБ и снижение частоты битовых ошибок (BER) на порядок в области практических значений. При этом алгоритм сохраняет приемлемую для реализации вычислительную сложность и демонстрирует высокую устойчивость в каналах с пространственно-коррелированными помехами, где классические методы оценки деградируют. Таким образом, вносится вклад в развитие эффективных методов приёма для широкополосных систем MIMO-связи в неблагоприятных эфирных условиях.

Ключевые слова: итеративная полуслепая оценка канала; алгоритм обесления и вращения; пространственно-коррелированные помехи; декаметровый диапазон; MIMO-системы

Введение

В сфере современных коммуникационных технологий оценка параметров каналов в многоантенных (Multiple Input Multiple Output, MIMO) системах представляет собой одну из ключевых задач, непосредственно влияющую на общую производительность и надёжность связи. Традиционные методы оценки, основанные исключительно на использовании пилотных (известных) символов, требуют значительных ресурсных затрат и сокращают полезную пропускную способность канала, особенно в условиях низкого отношения сигнал/шум. В то же время полностью слепые алгоритмы, хотя и не используют служебные данные, отличаются высокой вычислительной сложностью и склонностью к аномальным ошибкам в сложной помеховой обстановке. Полуслепые методы, занимающие промежуточное положение, в теории позволяют достичь баланса между точностью, сложностью реализации и спектральной эффективностью. Особую актуальность эта задача приобретает в условиях декаметрового (коротковолнового, HF) диапазона,

для которого характерны протяжённые многолучевые задержки, глубокие замирания, преобладание мощных внешних помех и, как следствие, низкое отношение сигнал/шум. Кроме того, физические ограничения на пространственное разнесение антенных элементов в этом диапазоне часто приводят к сильной пространственной корреляции как полезного сигнала, так и помех, что делает несостоятельными многие классические алгоритмы, разработанные для систем сотовой связи. Таким образом, разработка устойчивых и эффективных методов полуслепой оценки MIMO-канала, адаптированных к специфике ДКМВ-диапазона, является важной и востребованной научно-технической проблемой.

В данной работе представлен новый итеративный алгоритм, развивающий подход на основе факторизации канальной матрицы (WR-метод), ключевым преимуществом которого является совместное адаптивное уточнение всех оцениваемых параметров в едином цикле совместной обработки сигнала.

**Математическая модель ММО-канала
и методы оценки**

Рассмотрим математическую модель канала связи ММО (Multiple Input Multiple Output), включающего n_{Tx} передающих и n_{Rx} приемных антенн. Канал с гладкими замираниями описывается канальной матрицей H размерности $n_{Tx} \times n_{Rx}$, элементы которой h_{ij} представляют комплексные коэффициенты передачи от i -й передающей антенны к j -й приемной. Низкочастотная эквивалентная модель системы представляется в следующей матричной форме:

$$Y = HX + N, \quad (1)$$

где Y — матрица принятых отсчетов размерности $n_{Rx} \times (K + L)$; $X = \|X_p | X_d\|$ — матрица переданных данных, которая состоит из пилотной части $X_p = [x_1^{(p)}, \dots, x_L^{(p)}]$ размерности подматрицы размерности $n_{Rx} \times L$ и подматрицы информационных символов $X_d = [x_1^{(d)}, \dots, x_K^{(d)}]$ размерности $n_{Rx} \times K$; $x_i^{(p)} = [x_i^{(p)}, \dots, x_{N_{Tx},i}^{(p)}]^T$ и $x_j^{(d)} = [x_{1,j}^{(d)}, \dots, x_{N_{Tx},j}^{(d)}]^T$ — вектор-столбцы передаваемых пилотных и информационных символов, соответственно; а N — матрица отсчетов шума, размерности $n_{Rx} \times (K + L)$.

Шум предполагается аддитивным, гауссовским с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 , белым во временной области, но коррелированным в пространственном измерении, что отражается в корреляционной матрице $R_{NN} = E\{NN^H\}$. Все элементы матриц Y, H, X, N являются комплексными величинами в соответствии с моделью низкочастотного эквивалента. Канал будем считать неизменным на протяжении $K + L$ многомерных (ММО) канальных символов.

Классическая максимально правдоподобная (ML) оценка параметров канала ММО при гауссовских помехах определяется как $\hat{H}_{ML} = \operatorname{argmin}_{H, X_d} \{\|Y - HX\|_F^2\}$, где $X = \|X_p | X_d\|$ — матрица пилотов совместно с оценкой матрицы данных, а символ $\|\cdot\|_F^2$ — обозначает норму Фробениуса [2]. Решение может быть найдено перебором и, следовательно, имеет чрезмерную вычисли-

тельную сложность. При использовании максимально правдоподобной оценки только по пилотным символам:

$$\hat{H}_{ML} = \operatorname{argmin}_H \{\|Y - HX_p\|_F^2\}. \quad (2)$$

Это совпадает с оценкой по критерию наименьших квадратов (LS), вычисляемой путём умножения матрицы принятого сигнала на псевдообратную матрицу данных.

$$\hat{H}_{LS} = Y_p(X^H X)^{-1} X^H = Y_p X_p^\dagger, \quad (3)$$

где символом \dagger обозначена операция псевдообращения матрицы Мура-Пэнроуза $X^\dagger = (X^H X)^{-1} X^H$. При оценке канала по пилотным данным матрица псевдообращения X_p^\dagger может быть вычислена заранее. В противном случае, вычислительные затраты на её вычисления достаточно велики. Впрочем, на практике, получение LS оценки, представляющей собой решение задачи наименьших квадратов, как правило, производится без явного вычисления псевдообратной матрицы, а при помощи какого-либо вычислительно эффективного и численно устойчивого алгоритма решения задачи наименьших квадратов, например, QR разложения, модифицированной процедуры Грама-Шмидта, SVD разложения и т.д. [3].

Классический LS алгоритм оценки параметров ММО канала связи не учитывает корреляционных связей между парциальными каналами связи, которые всегда имеются в каналах связи ДКМВ диапазона, поскольку при используемых длинах волн декорреляция принимаемых сигналов часто невозможна из-за относительно малого пространственного разнеса приёмных и передающих антенн.

Классический алгоритм оценки параметров ММО канала связи по критерию минимума среднеквадратической ошибки (MMSE алгоритм оценки параметров ММО канала связи) определяется как $\hat{H}_{MMSE} = \operatorname{argmin}_{H} E \{\|H - \hat{H}_{MMSE}\|_F^2\}$. В классе линейных оценок алгоритм приводит к решению вида: $\hat{H}_{MMSE} = R_{HY} R_{YY}^{-1} Y$, где $R_{HY} = E\{HY\}$ и $R_{YY} = E\{YY\}$ — корреляционные матрицы, которые для ММО канала описываемого (1) могут быть вычислены как: $R_{YY} = X R_{HH} X^H + R_{NN}$, $R_{HY} = R_{HH} X^H$, где $R_{HH} = E\{HH^H\}$ и $R_{NN} = E\{NN^H\}$ — корреляционные матрицы.

ляционная матрица шума. Если помеха представляет собой белый шум не коррелированный по пространству, т.е. $R_{NN} = \sigma_n^2 I$. Тогда

$$\hat{H}_{MMSE} = R_{HH} \left(R_{HH} + \sigma_n^2 (X^H X)^{-1} \right)^{-1} X^{-1} Y. \quad (4)$$

Как видно из последнего выражения MMSE оценка канальной матрицы требует знания корреляционных свойств MIMO канала связи, описываемых R_{HH} . MMSE оценка намного вычислительно сложнее LS оценки из-за необходимости вычислять матрицу $(X^H X)^{-1}$. Заметного упрощения MMSE оценки можно достичь если заменить член $(X^H X)^{-1}$ в

$$(4) \text{ его средним значением } E \left\{ (X^H X)^{-1} \right\} = E \left\{ \frac{1}{|x|^2} \right\} I, \text{ тогда будем иметь: } \hat{H}_{MMSE} = R_{HH} \left(R_{HH} + \frac{\beta}{\left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right)} \right)^{-1} \hat{H}_{LS}.$$

Здесь величина $\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}$ есть отношение сигнал/шум, а $\beta = \frac{E \left\{ \frac{1}{|x|^2} \right\}}{E \{|x|^2\}}$ - просто константа, зависящая от вида сигнального созвездия.

Несмотря на оптимальность по тем или иным критериям, гарантирующую хорошие характеристики точности оценки параметров MIMO канала связи и структурную простоту все вышеперечисленные алгоритмы обладают существенным недостатком заключающимся в высокой вычислительной сложности их реализации из-за необходимости выполнения обращения матриц большого размера, а также имеют проблемы с численной устойчивостью данной операции по причине частой плохой обусловленности обрабатываемых матриц. Последняя проблема часто решается использованием обращения на основе SVD разложения, что, однако, ещё увеличивает вычислительную сложность алгоритма оценки. Но самым существенным недостатком также является то, что все выше представленные методы никак не используют информацию, содержащуюся в заранее неизвестных информационных символах.

Полуслепой алгоритм оценки параметров MIMO канала связи с гладкими замираниями

Многие полуслепые методы оценки канальной матрицы H основаны на её представ-

лении в виде произведения двух сомножителей $H = WQ^H$, один из которых W оценивается только вслепую, т.е. без использования знания передаваемых информационных данных, а другой Q оценивается только по известным пилотным символам. Поскольку для оценки первого сомножителя канальной матрицы может использоваться полный набор данных, включающий как известные, так и неизвестные приёмнику (пилотные) информационные символы, то объём данных для её оценки, как правило, ограничивается только интервалом стационарности канала связи, а не вычислительной сложностью процедуры оценки, что, теоретически, должно позволять оценить данный сомножитель канальной матрицы с достаточно высокой точностью. Оценка второго сомножителя производится только с использованием пилотных (т.е. заранее известных приёмнику) символов. Количество используемых для оценки пилотных символов может ограничиваться как величиной допустимой избыточности вводимой в сообщение, так и вычислительными возможностями по реализации процедуры оценки.

Наибольшее распространение получил т.н. алгоритм обеления и вращения (WR алгоритм), основанный на представлении канальной матрицы H размерности $n_{Rx} \times n_{Tx}$ в виде произведения т.н. «обеляющей» матрицы W размерности $n_{Rx} \times n_{Tx}$ и матрицы вращения Q размерности $n_{Tx} \times n_{Tx}$:

$$H = WQ^H. \quad (5)$$

Матрица вращения Q обязательно должна быть унитарной, т.е. должны выполняться следующие соотношения:

$$QQ^H = Q^H Q = I. \quad (6)$$

Представление канальной матрицы (5) получено в предположении, что число приёмных антенн n_{Rx} больше или равно числу передающих антенн n_{Tx} : $n_{Rx} \geq n_{Tx}$.

Также известен алгоритм в котором матрица W является верхней треугольной, а матрица Q унитарной, удовлетворяющей соотношению (6) [4]. Поскольку метод оценки канала сочетает использование чисто слепых методов с методами, основанными на использовании пилотных символов, то он называется полуслепым.

Методы слепого оценивания обесбеляющей матрицы

Рассмотрим обоснование слепого расчёта обесбеляющей матрицы.

Канальная матрица представляется как: $H = WQ^H$, где W - обесбеляющая матрица, а Q - матрица вращения, которая является унитарной, т.е.

$$QQ^H = Q^H Q = I. \quad (7)$$

Обесбеляющая матрица W оценивается вслепую, а матрица вращения Q - по пилотным символам. Сингулярное (SVD) разложение канальной матрицы H имеет вид: $H = P\Sigma V^H$. Отсюда непосредственно следует, что обесбеляющая матрица может быть вычислена как: $W = P\Sigma$, а матрица вращения находится как: $Q = V^H$. Очевидно, что она удовлетворяет (7), по определению SVD разложения. С учётом (7) можем записать:

$$HH^H = WQ^H(WQ^H)^H = WQ^H \underbrace{Q^H Q}_{\sigma_s^2 I} W^H = \sigma_s^2 WW^H \quad (8)$$

Считая, что шум - гауссовский, белый во времени, но коррелирован по пространству, то он полностью может быть описан своей корреляционной матрицей R_{NN} .

Полагая, что сигналы не коррелированы по времени и пространству, т.е.

$$E\{X_d X_d^H\} = \sigma_s^2 I, \quad (9)$$

будем иметь корреляционную матрицу принимаемых данных:

$$R_{YY} \approx HX_d X_d^H H^H + R_{NN} \approx \sigma_s^2 HH^H + R_{NN} = \sigma_s^2 WW^H + R_{NN}. \quad (10)$$

Откуда с учётом (8) следует уравнение для расчёта обесбеляющей матрицы:

$$WW^H = \frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - R_{NN}). \quad (11)$$

Самый вычислительно эффективный алгоритм решения данного уравнения - использование факторизации Холецкого, либо решение может быть получено при помощи разложения по собственным векторам и собствен-

ным числам правой части (11): $\frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - R_{NN}) = U\Sigma^2 U^H$. Тогда из равенства $EVD\{WW^H\} = EVD\left\{\frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - R_{NN})\right\}$ будем иметь:

$$W = U\Sigma. \quad (12)$$

По мере уточнения корреляционной матрицы шума будет уточняться оценка обесбеляющей матрицы.

Итеративный алгоритм оценки матрицы вращения при произвольной (неортогональной) пилотной матрице

Алгоритм может быть описан следующим образом:

1. вычисление матрицы $A = X_p Y_p^H W$
2. вычисление начального приближения для матрицы рассеяния: $\hat{Q}^{(0)} = V_Q U_Q$, где V_Q и U_Q - матрицы левых и правых вектор-столбцов SVD разложения матрицы $W^H Y_p X_p^H$: $U_Q \Sigma_Q V_Q^H = SVD[W^H Y_p X_p^H]$.
3. итеративно вычисляем для всех $1 \leq i \leq K_{iter}$ следующую матрицу:

$$T^{(k)} = A + (L\sigma_s^2 I - X_p X_p^H) \hat{Q}^{(i-1)} \Sigma^2,$$

и формируем на её основе итеративную оценку матрицы вращения: $\hat{Q}^{(i)} = U_T^{(k)} (V_T^k)^H$, где $V_T^{(k)}$ и $U_T^{(k)}$ - матрицы левых и правых вектор-столбцов SVD разложения матрицы T_k : $U_T^{(k)} \Sigma_T^{(k)} (V_T^k)^H = SVD[T^{(k)}]$.

Помимо фиксированного количества итераций, очевидным критерием их прекращения может быть контроль изменения нормы матрицы вращения:

$$\Delta = \left\| Q^{(i)} \right\|_F^2 - \left\| Q^{(i-1)} \right\|_F^2 \leq \Delta_{min}.$$

Методы совместного максимально правдоподобного оценивания обесбеляющей матрицы и матрицы вращения

В предположении гауссовской статистики сигнала и шума, логарифмическая функция правдоподобия для совместной оценки матрицы вращения и обесбеляющей матрицы может быть представлена как [6]:

$$L(W, Q) = -L_1(W) - L_2(W, Q), \quad (13)$$

где $L_1(W) = (K - L) \frac{1}{2} \ln[\det(WW^H + R_{NN})] - \sum_{i=L+1}^K Y_i^H (WW^H + R_{NN})^{-1} Y_i$ - функция правдоподобия слепой оценки обеляющей матрицы, зависящая только от вслепую принимаемых данных, а $L_2(W, Q) = \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=1}^L (Y_j - WQX_j)^H (Y_j - WQX_j)$ - логарифмическая функция правдоподобия совместной оценки W и Q только по пилотным символам. По мере увеличения количества неизвестных информационных символов K по сравнению с количеством пилотных символов L , влияние второго слагаемого $L_2(W, Q)$ на оценку обеляющей матрицы W ослабевает по сравнению с влиянием первого слагаемого $L_1(W)$, описывающего слепую оценку. Следовательно, при больших объёмах неизвестных данных может быть достаточно раздельного слепого оценивания обеляющей матрицы и последующего оценивания матрицы вращения только по пилотам.

В случае недостаточного количества данных, для точного выполнения слепого оценивания обеляющей матрицы (например, в случае недостаточной величины интервала стационарности канала связи) следует воспользоваться алгоритмом (13). Однако, вычислительная сложность данного алгоритма может быть чрезвычайно высока для его практического использования.

Известен итеративный полуслепой метод оценки ММО канала коммуникационной системы, алгоритм работы которого следующий:

1. расчёт корреляционной матрицы принятого сигнала $R_{YY} = Y Y^H$.
2. расчёт матрицы левых сингулярных векторов U и матрицы сингулярных чисел Σ при помощи SVD разложения матрицы $\frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - \sigma_n^2 I)$.
3. расчёт «обеляющей» матрицы $W = U \Sigma$.
4. расчёт правой и левой матриц сингулярных векторов U_m и V_m путём вычисления сингулярного разложения (SVD) от матрицы $W^H Y_p X_p^H$: $(V_m \Sigma_m U_m^H = \text{SVD}(W^H Y_p X_p^H))$.
5. расчёт матрицы вращения $\hat{Q} = V_m U_m^H$.

6. расчёт полуслепой оценки канальной матрицы $\hat{H}^{(i)} = W \hat{Q}^H$.

7. Прекращение расчёта, если выполнено заданное количество итераций: $i = i_{max}$.

8. детектирование неизвестных данных X_b по принятой матрице сигналов w на основе предыдущей оценки канальной матрицы $H^{(i)}$. В результате детектирования получаем матрицу оценок неизвестных информационных символов $\hat{X}_b^{(i)}$.

9. Полагаем $X_p^{(i)} = \|X_p | \hat{X}_b^{(i)}\|$ и $Y_p = \|Y | Y_b\|$ (последнее присваивание достаточно выполнить только на первом шаге, т.к. в ходе последующих итераций значения матрицы Y_b не изменяются).

10. Переходим к 4-му шагу алгоритма.

Недостатком метода является то, что в ходе итераций, по мере декодирования неизвестных данных X_b , происходит обновление только матрицы вращения Q , но не «обеляющей» матрицы W . Последняя вычисляется только один раз на третьем шаге.

Суть предлагаемого подхода

Предлагается итеративно уточнять оценку канальной матрицы H после декодирования информационных символов X_b по результатам предыдущей оценки \hat{H} . Однако, уточнению должны подвергаться не только матрица вращения Q , но и обеляющая матрица W . Причём при расчёте обеляющей матрицы предлагается использовать оценку корреляционной матрицы отсчётов помех \hat{R}_{NN} , которую можно получить, располагая решениями относительно отсчётов неизвестных информационных символов \hat{X} на выходе демодулятора или декодера помехоустойчивого кода.

Общую логику работы алгоритма, включая опциональный шаг расширения пилотной матрицы и ветвление вычислительных процедур в зависимости от ортогональности результирующей матрицы, наглядно иллюстрирует блок-схема, представленная на рис. 1.

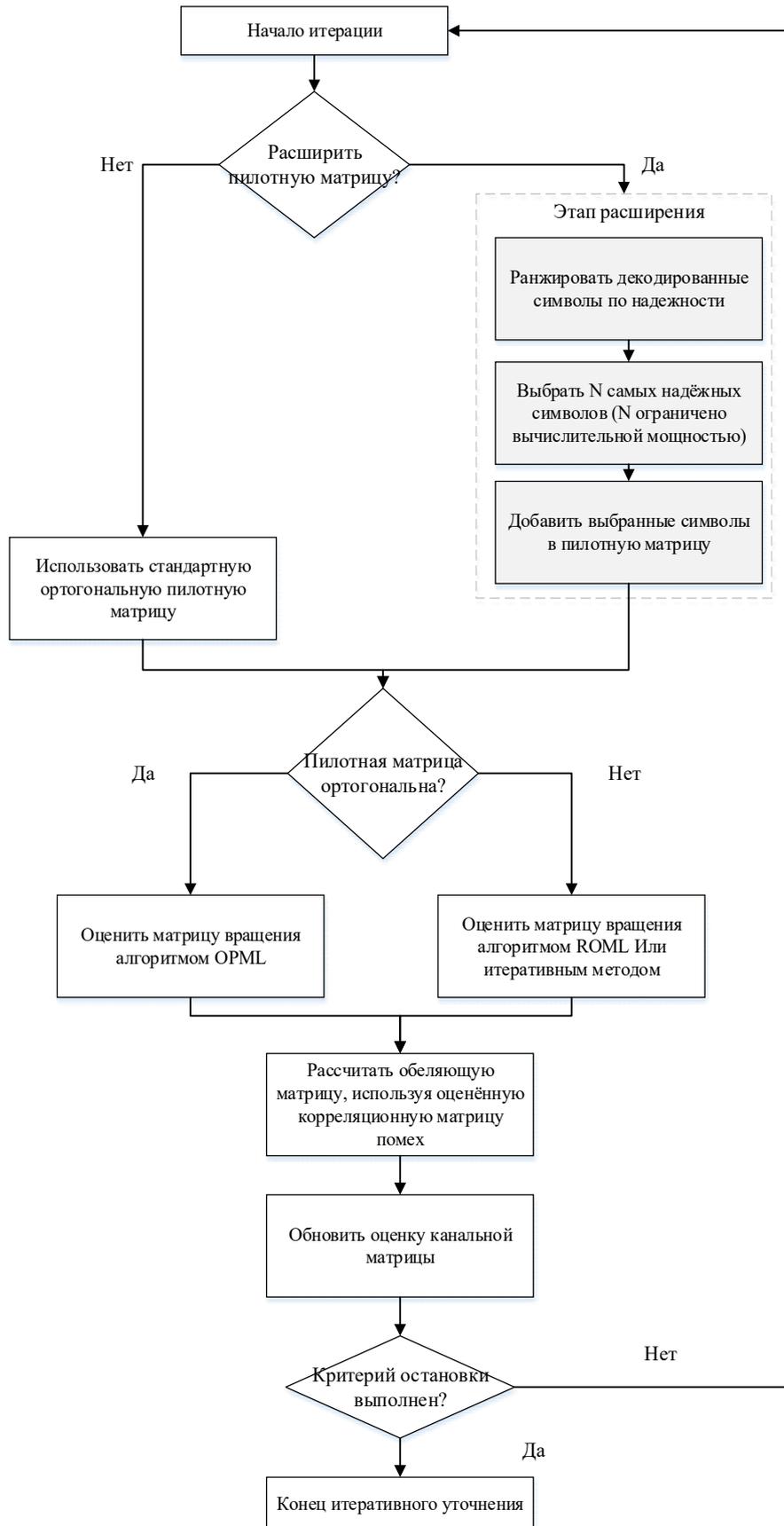


Рис. 1. Алгоритм итеративного уточнения оценки канальной матрицы с расширением пилотной последовательности

Дополнительно (но не обязательно) пилотная матрица может быть расширена за счёт включения в неё декодированных информационных символов. Причём количество добавляемых в пилотную матрицу столбцов может выбираться исходя из имеющейся в распоряжении вычислительной мощности исходя из требования выполнения вычислений в реальном времени. Отбор столбцов для добавления должен производиться после ранжирования по надёжности решений, оцениваемой по сумме метрик логарифмических правдоподобий декодированных символов.

Вследствие такого расширения матрица \tilde{S} перестает быть ортогональной. Это делает неприменимым стандартный и простой алгоритм OPML (Orthogonal Pilot Maximum Likelihood), который эффективен только для ортогональных пилотных последовательностей. Поэтому для оценки матрицы вращения по неортогональной матрице необходимо перейти либо к алгоритму ROML (Robust Orthogonal ML), либо к специальному итеративному алгоритму, адаптированному для работы с неортогональными пилотами. Предлагаемый же итеративный подход с избирательным расширением пилотной матрицы представляет собой практичный компромисс, позволяющий существенно повысить точность оценки канала за счёт дополнительной, но управляемой вычислительной сложности.

Описание предлагаемого алгоритма

1. Полагаем в качестве начального (нулевого, $i = 0$) приближения для корреляционной матрицы отсчётов шума $R_{NN}^{(0)} = \sigma_n^2 I$. Либо (при наличии такой возможности) проводим измерения величин отсчётов сигнала на выходах всех приёмников всех антенных элементов в отсутствии передаваемого полезного сигнала и формируем их соответствующую матрицу отсчётов шума \tilde{Y} , не содержащих полезного сигнала. По данной матрице производим расчёт начального приближения корреляционной матрицы помех как: $R_{NN}^{(0)} = \tilde{Y} \tilde{Y}^H$. Либо в качестве начального приближения используем корреляционную матрицу, полученную в ходе декодирования предыдущего кодового слова.

2. Расчёт корреляционной матрицы принятого сигнала: $R_{YY} = Y Y^H$.

3. Расчёт матрицы левых сингулярных векторов $U^{(i)}$ и матрицы сингулярных чисел

$\Sigma^{(i)}$ при помощи SVD разложения матрицы $\frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - \hat{R}_{NN}^{(i)})$:

$$U^{(i)} \Sigma^{(i)} V^{(i)} = \text{SVD} \left[\frac{1}{\sigma_s^2} (R_{YY} - \hat{R}_{NN}^{(i)}) \right].$$

4. Расчёт «обеляющей» матрицы: $W^{(i)} = U^{(i)} \Sigma^{(i)}$.

5. Расчёт правой и левой матриц сингулярных векторов U_m и V_m путём вычисления SVD от матрицы $(W^{(i)})^H Y_p^{(i)} (X_p^{(i)})^H$:

$$U_m^{(i)} \Sigma_m^{(i)} V_m^{(i)} = \text{SVD} \left[(W^{(i)})^H Y_p^{(i)} (X_p^{(i)})^H \right]$$

6. Расчёт матрицы вращения $\hat{Q}^{(i)} = V_m^{(i)} (U_m^{(i)})^H$.

7. Расчёт полуслепой оценки канальной матрицы $\hat{H}^{(i)} = W^{(i)} (\hat{Q}^{(i)})^H$.

8. Детектирование неизвестных данных X_b по принятой матрице сигналов Y_b на основе оценки канальной матрицы $\hat{H}^{(i)}$. В результате детектирования (декодирования) получаем матрицу оценок неизвестных информационных символов $\hat{X}_b^{(i)}$.

9. Прекращение расчёта, если выполнено заданное количество итераций: $i = i_{max}$.

10. Полагаем $X_p^{(i)} = \|X_p | \hat{X}_b^{(i)}\|$ и $Y_p = \|Y_p | Y_b\|$ (последнее присваивание достаточно выполнить только на первом шаге, т.к. в ходе последующих итераций значения матрицы Y_b не изменяются).

11. Оценка корреляционной функции отсчётов шума: $\hat{R}_{NN}^{(i)} = (Y - \hat{X}_p^{(i)}) (Y - \hat{X}_p^{(i)})^H$.

12. Если вычислительные возможности устройства, реализующего оценку, ограничены, то заново формируем матрицы $X_p^{(i)}$ и Y_p добавляя в них только такое количество столбцов, содержащих оценки заново декодированных информационных символов, которое может гарантировать возможность выполнения алгоритма оценки - декодирования (оценки - демодуляции) в реальном времени. При использовании демодулятора (декодера) с мягкими решениями целесообразно отбирать только столбцы наиболее надёжными решениями, предварительно проранжировав все столбцы по сумме метрик в виде логарифмических правдоподобий.

13. $i = i + 1$.
14. Переходим к 3-му шагу.

Результаты моделирования

Моделирование работы предложенного алгоритма проводилось точно при тех же условиях, что описаны в [1].

На рис. 2 представлены кривые помехоустойчивости ММО системы связи, в которой в качестве алгоритма оценки канальной матрицы H использовались: 1) предложенный алгоритм (обозначен *new*), 2) прототип предложенного алгоритма (обозначен *ITRTV*), 3) алгоритм оценки канала только по пилотным символам, полученный по критерию наименьших квадратов (обозначен как *LS*), 4) максимально правдоподобный алгоритм согласно критерию, использующий ортогональный набор пилотных символов в виде матрицы Адамара (*OPML*) и 5) гипотетический алгоритм, использующий точное знание канальной матрицы (обозначен как *Perfect*).

Канальная матрица оценивалась по сегменту, состоящему из 4-х ортогональных BPSK пилотов и блоку неизвестных случайных данных в виде 100 символов. Параметры

канала полагались неизменными на блоке анализа. Канальная матрица состояла из независимых нормально распределённых комплексных случайных величин с нулевым средним и единичной дисперсией. Т.е. канал предполагался релевским. Удельная доля битовых ошибок (BER) вычислялась по 10000 (для 16QAM) и 5000 (для 64QAM) реализациям принимаемых блоков.

На рис. 2 приведены результаты моделирования для 2x4 ММО при модуляции 16QAM и коде Аламоути при 2-х и 5-х итерациях, соответственно, а на рис. 3 приведены аналогичные результаты для 4x8 ММО и 64QAM при коде в виде обобщённых комплексных ортогональных форм G4. Из графиков видно, что предложенный алгоритм обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с прототипом от 0,5 до 1,5 дБ. А по величине BER выигрыш в области представляющих практический интерес величин значений BER иногда превышает порядок.

Характеристики ранее известных алгоритмов оценки канала, полученные в ходе моделирования, отличаются от приведённых в [1, 4, 5] в пределах статистической погрешности.

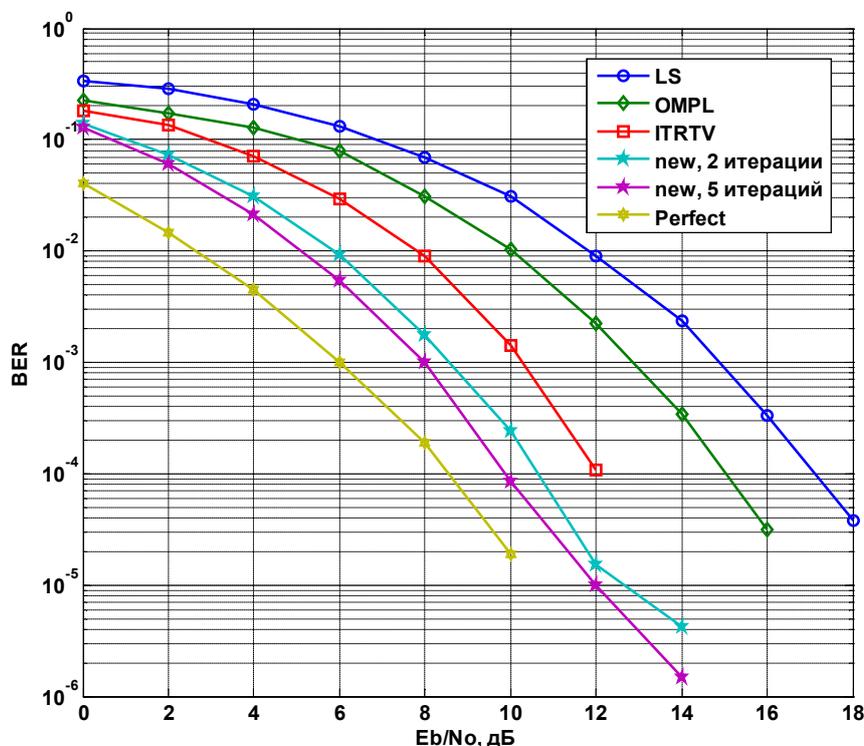


Рис. 2. Характеристики помехоустойчивости 2x4 ММО системы связи, код Аламоути, 16QAM

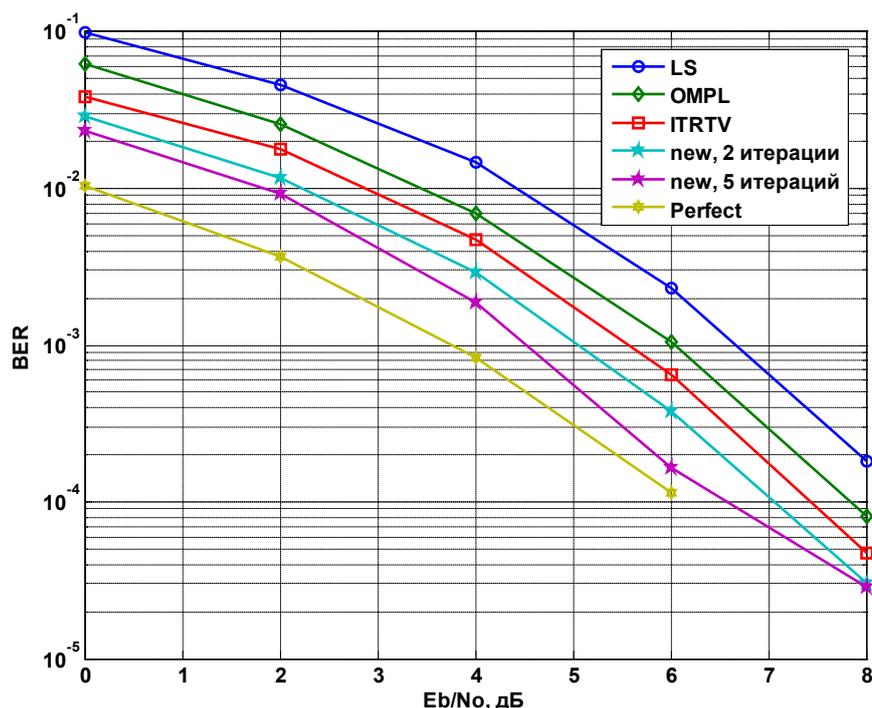


Рис. 3. Характеристики помехоустойчивости 4x8 MIMO системы связи, 64QAM

Заключение

Таким образом, был представлен новый полуслепой итеративный алгоритм оценки MIMO канала связи, основанный на разложении канальной матрицы в виде произведения обесвещающей матрицы и матрицы вращения, отличительной особенностью которого от ранее известных, является итеративное уточнение не только матрицы вращения, но и обесвещающей матрицы и совмещение процедур оценки с алгоритмом демодуляции и декодирования полезного сигнала. Алгоритм обладает приемлемой вычислительной сложностью реализации.

Результаты моделирования демонстрируют энергетический выигрыш предлагаемого алгоритма по отношению к наиболее совершенному из ранее известных итеративному алгоритму полуслепого оценивания в пределах от 2 до 4 дБ в каналах с некоррелированными помехами на приеме.

В каналах с коррелированными помехами на приеме алгоритм демонстрирует удовлетворительные характеристики в широком диапа-

зоне отношений сигнал/шум и значений корреляции помех на входах антенн приемника, в то время как ранее известные аналоги часто полностью теряют работоспособность в данных каналах.

Литература

1. Уоткинс Д. Основы матричных вычислений. М.: Бинном, 2006 г. 664 с
2. Голуб Д., Ван Л.Ч. Матричные вычисления. Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 548 с.
3. Bhalani J., Trivedi A. I. Modified Whitening Rotation based Joint Semi-blind Channel and Data Estimation Scheme for Rayleigh Flat Fading MIMO channels. 2012. 16 с.
4. Hammarberg P. Iterative receivers with channel estimation for MIMO and multi-user OFDM systems. – Dpt. of Electrical and Information Technology, Lund University, Sweden, 2012. 12 с.
5. Малютин А.А. Исследование и разработка итеративных методов обработки сигналов для высокоскоростных модемов КВ диапазона: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Воронеж, 2009. 179 с.
6. Малютин А.А., Меркулов Д.В., Способ итеративной обработки сигнала для последовательного модема и устройство, его реализующее. Патент на изобретение RU 2369032 14 с.

Информация об авторах

Малютин Александр Анатольевич – канд. техн. наук, ведущий инженер, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: malyutin.a.a@yandex.ru, SPIN-код: 9345-2602

Портниченко Михаил Дмитриевич – главный конструктор по системам связи специального назначения, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: portni4enkom@yandex.ru, SPIN-код: 4714-0145; Researcher ID: N-9899-2018

Зюзин Александр Николаевич – ведущий инженер, АО НВП «Протек» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: alexandrzyuzin9@gmail.com, SPIN-код: 1208-3868

Iterative algorithm for semi-blind evaluation of a multi-antenna (MIMO) communication channel

A.A. Malyutin, M.D. Portnichenko, A.N. Zyuzin

JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK», Voronezh, Russia

Abstract. The paper proposes an iterative algorithm for semi-blind estimation of channel parameters for multi-antenna (MIMO) systems based on the classical WR method (decomposition into a whitewashing matrix and a rotation matrix). The essence of the improvement lies in the joint cyclic refinement of both matrices — whitewashing and rotation — as part of a single iterative process combined with demodulation of the useful signal. This makes it possible to adaptively take into account the changing statistical properties of interference, in particular its spatial correlation, which is critically important for the decimeter and short wave range (DCMW), where external correlated interference often dominates over internal noise. The algorithm also provides for the possibility of expanding the reference (pilot) sequence due to the most reliable estimates of information symbols obtained in the previous iteration, which increases the efficiency of data use. The results of numerical simulation for 2x4 and 4x8 MIMO systems with different modulation and coding schemes demonstrate a significant advantage of the proposed method in comparison with analogues. It provides an energy gain of up to 1.5–4 dB and a reduction in the bit error rate (BER) by an order of magnitude in the field of practical values. At the same time, the algorithm retains a computational complexity acceptable for implementation and demonstrates high stability in channels with spatially correlated interference, where classical estimation methods degrade. Thus, the work contributes to the development of effective reception methods for broadband MIMO communication systems in unfavorable on-air conditions.

Key words: iterative semi-blind channel estimation; whitewashing and rotation algorithm; spatially correlated interference; decimeter range; MIMO systems

References

1. Watkins D. “Fundamentals of matrix calculations”, Moscow: Binom, 2006, 664 p.
2. Golub D., Van L. Ch. “Matrix calculations”, Moscow: Mir, 1999, 548 p.
3. Bhalani J., Trivedi A.I. “Modified semi-blind joint channel based on bleaching rotation and a data estimation scheme for MIMO channels with flat Rayleigh attenuation”, 2012, 16 p.
4. Hammarberg P. “Iterative receivers with channel estimation for MIMO and multiuser OFDM systems”, Dpt. of Electrical Engineering and Information Technology, Lund University, Sweden, 2012, 12 p.
5. Malyutin A.A. “Research and development of iterative signal processing methods for high-speed HF modems” (“Issledovanie i razrabotka ite-rativnykh metodov obrabotki signalov dlya vysokosko-rostnykh modemov KV diapazona”), diss., Voronezh, 2009, 179 p.
6. Malyutin A.A., Merkulov D.V. “Method of iterative signal processing for serial modem and the device that implements it” (“Sposob iterativnoy obrabotki signala dlya posledovatel'nogo modema i ustroystvo, yego realizuyushchee”), patent RU 2369032, 14 p.

Submitted 25.12.2025; revised 01.02.2026

Information about the authors

Aleksandr A. Malyutin, Cand. Sci. (Technical), Leading Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: malyutin.a.a@yandex.ru, SPIN-код: 9345-2602

Mikhail D. Portnichenko, Chief Designer for Special-Purpose Communication Systems, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: portni4enkom@yandex.ru, SPIN-код: 4714-0145; Researcher ID: N-9899-2018

Aleksandr N. Zyuzin, Lead Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: alexandrzyuzin9@gmail.com, SPIN-код: 1208-3868

Концептуальное проектирование распределенной стохастической антенной решетки на малых беспилотниках

М.Д. Бавижев¹, А.А. Рахманов², Г.В. Слюсарев³

¹НИЦ АО «Научно-производственное предприятие «РАДИЙ», г. Москва, Россия

²ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», г. Москва, Россия

³Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

Аннотация. Рассматривается концепция распределённых активных фазированных антенных решёток, формируемых на базе роев малых беспилотных летательных аппаратов воздушного и космического базирования. Предлагаемый подход основан на принципе стохастического синтеза апертуры, при котором виртуальная антенна большого размера формируется за счёт пространственного распределения антенных элементов на подвижных носителях с последующей цифровой компенсацией фазовых и временных искажений. Когерентность излучения и приёма обеспечивается не жёстким геометрическим построением решётки, а итеративной обработкой I/Q-сигналов с учётом текущего взаимного расположения элементов и ошибок позиционирования. Приводятся совокупность математических моделей, описывающих формирование диаграммы направленности, когерентное накопление сигналов и влияние стохастических возмущений на характеристики системы. Выполнен параметрический анализ и численное моделирование для сценариев воздушного и космического базирования, позволяющие оценить энергетический потенциал, угловое разрешение и устойчивость к потерям отдельных элементов роя. Отдельное внимание уделено ключевым технологическим аспектам реализации: сверхточной синхронизации времени и частоты, управлению роем, высокоскоростной передаче данных и требованиям к производительности вычислительных средств. Показана целесообразность применения методов искусственного интеллекта для мультидисциплинарной оптимизации архитектуры системы и ускорения проектных процедур.

Ключевые слова: активные фазированные антенные решетки (АФАР); синтез апертуры; роевые системы; беспилотные летательные аппараты (БПЛА); искусственный интеллект (ИИ); синхронизация; фазовая компенсация

Введение

Современные радиолокационные системы с жестко закрепленными АФАР характеризуются высокой стоимостью, массогабаритными показателями и ограниченной мобильностью. Перспективной альтернативой выступают распределенные системы, где антенные элементы размещаются на множестве подвижных носителей, образуя виртуальную апертуру принципиально неограниченного размера [1, 2]. Данная работа развивает концепцию стохастической цифровой синтезированной апертуры, в которой когерентность достигается не за счет идеальной геометрии размещения элементов, а путем итеративной цифровой компенсации фазовых ошибок, возникающих при их случайном распределении в пространстве [3, 4]. Такой подход позволяет создавать высокоподвижные, реконфигурируемые и отказоустойчивые системы радиолокации и связи.

Моделирование распределенных стохастических когерентных систем

Математической основой для моделирования является концепция, рассматривающая текущую конфигурацию системы с учетом независимых гауссовых ошибок позиционирования σ_{pos} и ориентации σ_{orient} в пространстве. Каждый i -й элемент роя БПЛА характеризуется своим вектором положения $\vec{r}_i(t)$ и фазовым центром подрешетки. Мгновенная диаграмма направленности (ДН) такой нерегулярной решетки описывается векторной суммой комплексных амплитуд от каждого элемента:

$$F(\theta, \phi, t) = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot A_i \cdot \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{r}_i(t) \cdot \vec{s}(\theta, \phi) + j \cdot \Delta\phi_i^{error}(t)\right), \quad (1)$$

где \vec{s} – единичный вектор в направлении (θ, ϕ) ;

ω_i – весовой коэффициент;

A_i – амплитуда;

$\Delta\phi_i^{error}$ – совокупная фазовая ошибка.

Процесс итеративной компенсации этих ошибок можно описать в терминах модели внимания, аналогичной используемой в нейросетях-трансформерах [5]:

$$Attention(Q, K, V) = \text{soft max} \left(\frac{Q \times K^T}{\sqrt{d}} \right) \times V, \quad (2)$$

где Q (Query) – вектор запроса, соответствующий желаемому направлению излучения/приема;

K (Key) – матрица ключей, содержащая информацию о текущем положении $\vec{r}_i(t)$ и фазовом состоянии каждого элемента;

V (Value) – матрица значений, представляющая собой полезные I/Q сигналы, принимаемые или излучаемые каждым элементом.

Данная аналогия подчеркивает, что система динамически «фокусирует внимание» на цели, вычисляя веса ω_i , которые компенсируют фазовые искажения, вызванные стохастичностью апертуры.

Критические проблемы и пути их преодоления: аппаратные и архитектурные решения

Реализация распределенной стохастической АФАР сопряжена с рядом критических проблем, для преодоления которых требуются конкретные аппаратные и архитектурные решения, подтвержденные практикой.

Сверхточная синхронизация и фазовая когерентность

Проблема: Для X-диапазона ($f_c \approx 10$ ГГц) допустимая фазовая ошибка в 5° требует временной синхронизации с точностью $\sigma_t \leq 70$ пс. Накопление фазовой ошибки всего в 1.5 пс уже приводит к значительной деградации коэффициента когерентности η и подавлению боковых лепестков ДН. В роевой системе, где каждый элемент обладает собственной эталонной частотой, поддержание такой точности становится критически сложной задачей, особенно в условиях доплеровских сдвигов и изменяющейся геометрии системы.

Пути решения: Комбинация аппаратных и программных методов.

Аппаратная основа: Использование высокостабильных опорных генераторов (ТСХО/ОСХО с стабильностью 10–11 и луч-

ше) в связке с GNSS/RTK-приемниками (например, ublox ZED-F9P, Septentrio Mosaic), обеспечивающих привязку к PPS-сигналу и точность позиционирования $\leq 1 - 2$ см. Для космических систем дополнительно применяются оптические межспутниковые линии связи (OISL) для передачи эталонных сигналов.

Архитектура системы: Создание единой временной шкалы на борту каждого носителя с распределением синхросигналов по всем модулям: аналого-цифровым преобразователям (АЦП), программируемым логическим интегральным схемам (ПЛИС) через специализированные синхросети (White Rabbit, IEEE 1588 PTP). На стороне вычислительного центра (ВЦ) используется протокол IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol) для компенсации сетевых задержек.

Цифровая компенсация: Остаточные дрейфы компенсируются в ВЦ алгоритмами взаимной калибровки, использующими данные о взаимном положении и измерения фазы от реперных источников или самих целей.

Примеры реализации: Данный подход разработан в проектах типа DARPA NTS-3, где осуществляется передача I/Q и навигационных данных на наземный центр с привязкой к UTC [6]. В программе SPACE HAUC демонстрируется синхронизация группировки CubeSat с точностью лучше 100 пс [2].

Управление роем и относительное позиционирование

Проблема: Поддержание требуемой геометрии роя с точностью 0.1 – 1.0 м в условиях внешних возмущений (турбулентность, ветровые нагрузки). Динамическое перестроение формации должно осуществляться без потери когерентности, что требует точного прогнозирования траекторий и предотвращения столкновений. Погрешности позиционирования напрямую влияют на фазовые ошибки и, следовательно, на качество синтезированной ДН.

Пути решения:

— Навигационная система: Интеграция GNSS/RTK и инерциальных навигационных систем (IMU/INS) на каждом БПЛА с точностью позиционирования ≤ 3 см и угловой ориентации $\leq 0.1^\circ$.

— Алгоритмы управления: Применение алгоритмов роевого интеллекта, работающих поверх точных данных о местоположении, обеспечивающих предотвращение столкнове-

ний и адаптивное перестроение формации с учетом аэродинамической интерференции.

— Дополнительная калибровка: Использование взаимных измерений дальности и углов между БПЛА с помощью дополнительных радиолокационных или оптических средств.

Примеры реализации: Опыт Airbus в проектах Distributed Aperture подтверждает реализуемость mesh-сетей для обмена данными и координации внутри роя [7]. В работах Brown и Clark [8] демонстрируется точное позиционирование роя БПЛА с использованием RTK-GNSS.

Реализация ключевой проблемы – бортовой обработки данных заключается в том, чтобы постепенно уменьшить поток данных с уровня, недоступного для радиоканала (порядка нескольких Гбит/с после АЦП), до уровня, совместимого с пропускной способностью бортовой и междоузовой связи (сотни Мбит/с), при сохранении фазовой когерентности и достаточной информативности сигнала.

На рис. 1 показана последовательность основных этапов обработки на борту БПЛА и передачи массива I/Q в ВЦ.

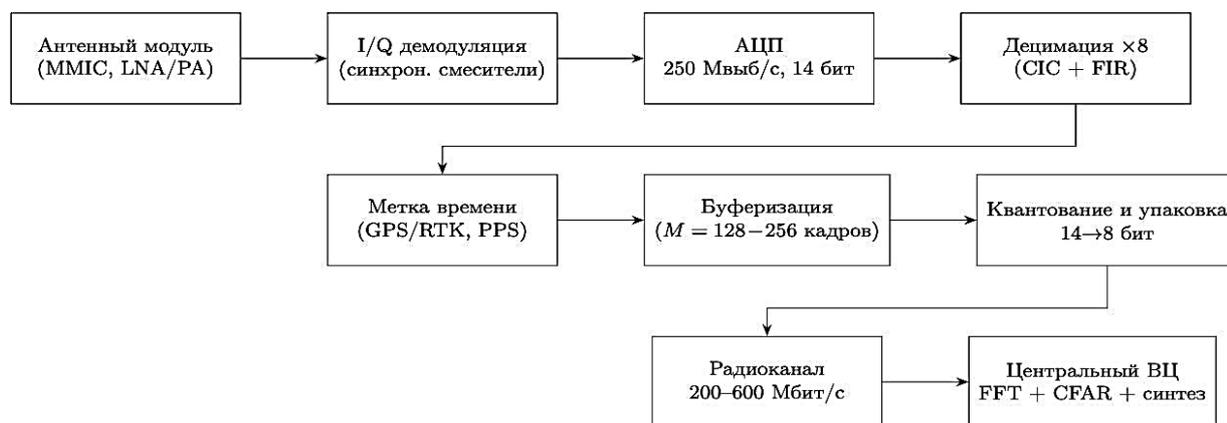


Рис. 1. Последовательность обработки сигналов на борту БПЛА и передача массива I/Q

Многосенсорная интеграция и сопровождение целей

Проблема: Радиолокационные данные, особенно от малозаметных целей, могут быть недостаточны для уверенной идентификации и непрерывного сопровождения в условиях помех и маневров цели. Необходима дополнительная информация для верификации типа цели и повышения точности сопровождения.

Пути решения: Интеграция оптико-электронной системы (ОЭС) в состав одного или нескольких БПЛА роя. ОЭС, включающая телевизионный и инфракрасный каналы, обеспечивает:

— Оптический захват цели: После первичного обнаружения радиолокатором, ОЭС осуществляет захват цели в оптическом диапазоне по грубым координатам.

— Точное сопровождение: Высокая угловая разрешающая способность ОЭС позволяет вести сопровождение с точностью до десятков микродиан.

— Идентификация: Анализ изображения цели позволяет классифицировать ее тип (БПЛА, птица, др.) и оценить параметры.

Примеры реализации: Данные от ОЭС передаются в ВЦ и используются для:

1. Уточнения угловых координат цели при когерентном накоплении РЛ сигнала.
2. Верификации треков после обработки радиолокационных данных.
3. Формирования комплексного радиолокационно-оптического портрета цели.

Такой подход позволяет существенно повысить достоверность информации о цели в сложной помеховой обстановке.

Высокоскоростной сбор, обработка и передача данных

Проблема: Поток данных с одного двухканального (I/Q) АЦП при $f_s = 250$ Мвыб/с и разрядности 14 бит достигает $R_{ADC} \approx 7$ Гбит/с. Для системы из 4 БПЛА совокупный поток составляет уже 28 Гбит/с, что на несколько порядков превышает пропускную способность типичных радиоканалов БПЛА. Проблема усугубляется необходимостью гарантированной доставки данных с минимальными задержками

для обеспечения когерентного накопления в реальном времени.

Пути решения: Многоэтапная предварительная обработка на борту.

— Аппаратная платформа: Использование ПЛИС/SoC (Xilinx Zynq UltraScale+, Intel Cyclone 10 GX), способных обрабатывать потоки до 10 Гбит/с и реализующих алгоритмы цифровой фильтрации в реальном времени.

— Алгоритмы предобработки: Каскадная децимация ($\times 8$ и более) с применением CIC и FIR-фильтров, подавление внеполосных помех, компенсация DC-смещения и I/Q -несимметрии. Последующее квантование 14-битных отсчетов до 8 бит с использованием нелинейных алгоритмов компандирования для сохранения динамического диапазона.

— Результат: Поток данных снижается до управляемых 80 – 160 Мбит/с на один БПЛА при сохранении 90-95 % информативности сигнала.

Примеры реализации: Для передачи используются высокоскоростные радио-модемы (802.11ac/ax, 802.11ad/ay, специализированные OFDM-модемы) с пропускной способностью 200–600 Мбит/с, что подтверждается практикой компаний Analog Devices в их SDR-платформах с передачей JESD204B/C потоков по 10G Ethernet [9]. Lockheed Martin в проекте COHERENT SWARM SAR демонстрирует передачу подготовленных I/Q данных от роя БПЛА [10].

Производительность центрального вычислительного центра (ВЦ)

Проблема: Обработка агрегированных потоков I/Q -данных от всего роя, включая синтез апертуры, 2D FFT, CFAR-обнаружение и компенсацию фазовых ошибок, требует исключительной вычислительной мощности. Для системы из 4 БПЛА с потоком 640 Мбит/с и временем когерентного накопления 0.4 с требуется обработка массива данных объемом 300 МБ за время, не превышающее десятки миллисекунд. Традиционные CPU-архитектуры не способны обеспечить такую производительность.

Пути решения: Специализированная GPU-подсистема.

— Требования к GPU: Производительность $\geq 10 - 20$ TFLOPS (FP32), объем памяти $\geq 24 - 48$ ГБ, пропускная способность памяти ≥ 600 ГБ/с (например, NVIDIA A100).

— Сетевая инфраструктура: Интерфейсы 10/25/100 GbE с поддержкой jumbo frames,

RSS и, что критично, технологий zero-copy DMA и GPUDirect RDMA для минимизации задержек при передаче данных непосредственно в память GPU.

— Оптимизация алгоритмов: Использование библиотек cuFFT, cuBLAS, cuSignal для эффективной реализации алгоритмов на GPU.

Примеры реализации: Архитектура следует принципам, заложенным в NVIDIA Aerial SDK для обработки I/Q -потоков в сетях 5G [11]. Это позволяет обрабатывать данные роя из 4 БПЛА с задержкой $\sim 2 - 6$ мс.

Анализ космической распределенной системы

Постановка задачи и параметры модели

Рассмотрена система на базе роя из 16 МКА (4×4), каждый из которых оснащен подрешеткой 2×2 ППМ X-диапазона ($\lambda = 0.03$ м). Шаг идеальной регулярной структуры dsuper = 13 м, с случайным отклонением положений центров МКА (джиттер) в диапазоне 3 – 7 м, что моделирует реальные ошибки орбитального позиционирования. Высота орбиты $H = 400$ км. Точность определения взаимной геометрии системы с помощью систем дифференциальной коррекции и оптических измерений составляет ≈ 3 мм.

Энергетический анализ

Максимальная дальность действия радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) оценивается по модифицированному уравнению дальности [12]:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{avg}} \cdot G^2 \cdot \lambda^3 \cdot \sigma_0 \cdot \rho_a}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot F_n \cdot v \cdot \sin \theta \cdot \text{SNR}_{\min}}, \quad (3)$$

где P_{avg} – средняя мощность передатчика;

G – коэффициент усиления антенны;

σ_0 – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) поверхности;

ρ_a – разрешающая способность по азимуту

v – скорость носителя;

θ – угол падения.

На рис. 2 представлена зависимость азимутального разрешения на поверхности Земли от числа кадров сеанса в режиме SAR (логарифмическая шкала по оси N). Показаны две кривые: идеальная когерентность (пунктир) и с

учётom фазовых потерь при точности позиционирования $\sigma_r = 3$ мм.

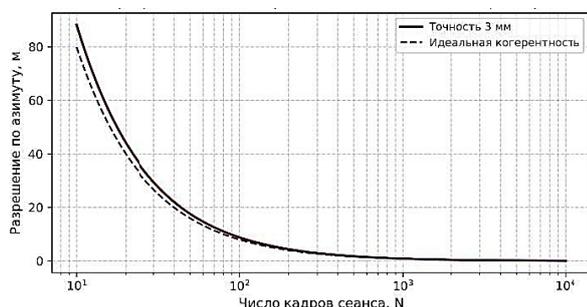


Рис. 2. Зависимость разрешения на поверхности Земли от числа кадров в режиме SAR: идеальный случай и с учётом потерь когерентности при точности позиционирования 3 мм

Из рис. 2 видно, что при выбранной точности позиционирования 3 мм зависимость разрешения от числа кадров практически совпадает с идеальной кривой уже при накоплении нескольких сотен кадров. В идеальном случае увеличение числа кадров от $N = 10$ до $N = 10^4$ приводит к монотонному улучшению разрешения, что соответствует линейному рос-

ту эффективной синтезированной апертуры $D_{синт} \propto N \cdot D_{syn} = V(NT_{frame})$.

Результаты моделирования и выводы

Анализ для космического базирования: Как следует из табл. 1, ключевым фактором является поддержание высокого коэффициента когерентности η , который напрямую зависит от точности синхронизации и позиционирования. При точности позиционирования фазовых центров ≤ 3 мм и использовании когерентного накопления (~ 2000 кадров) система способна обеспечить разрешение по дальности 7–10 м и субметровое разрешение по азимуту (~ 0.9 м) с орбиты 400 км. Достигнутый эквивалентный размер синтезированной апертуры в 7.5 км принципиально недостижим для монолитных космических платформ. Основными проблемами для орбитального сегмента являются обеспечение гигабитных каналов межспутниковой связи для обмена I/Q данными и точное прогнозирование орбит для компенсации фазового набега.

Таблица 1

Параметры и характеристики космической распределенной АФАР

Параметр	Обозначение	Значение	Комментарий
Число МКА / ППМ	N_{MS} / N_{el}	16/64	4×4 МКА, 2×2 ППМ
Шаг супермассива	d_{super}	13 м	
Длина волны	λ	0.03 м	X-диапазон
Полоса сигнала	B	20-40 МГц	$R_{range} = c/(2B) \approx 7.5 - 3.75$ м
Коеф. когерентности	η	0.82	при $\sigma_r = 3$ мм
Когерентное накопление	N	2000	выигрыш $\sim \eta N \approx +33$ дБ
Мгновенное разрешение	R_{diff}	~ 270 м	$H = 400$ км, $D \approx 39$ м
Разрешение по азимуту (SAR)	$R_{az, SAR}$	~ 0.9 м	$D_{syn-equiv} \approx 7.5$ км

Анализ воздушной распределенной системы

Постановка задачи и параметры модели

Задачей являлось обнаружение малоаметной цели (малый БПЛА с ЭПР $\sigma \approx 0.05$ м², -13 dBsm) в режиме когерентного накопления. Моделировалась система из 4 БПЛА, каждый с подрешеткой 4×4 приемопередающих модулей (ППМ) X-диапазона 3. Шаг между узлами носителей – 5 м, амплитуда случайных отклонений («болтанки») – ± 5 см, точность относительного позициониро-

вания – ≤ 3 мм, частота обновления кадров – 1000 Гц.

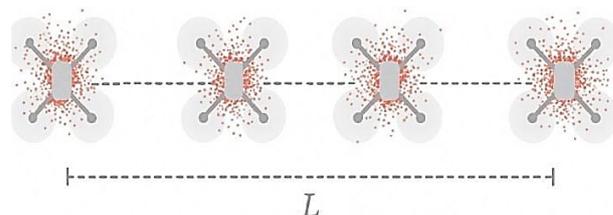


Рис. 3. Линейная стохастическая разреженная цифровая апертура из 4 БПЛА

Иллюстрация на рис. 3 демонстрирует вариант линейной АФАР на базе 4 дронов, точками в узлах показаны случайные позиции БПЛА в кадре. Концепция позволяет формировать воздушные антенные решетки практически неограниченного размера за счет масштабируемого объединения идентичных ячеек-дронов в единую синхронизированную систему.

Результаты моделирования и выводы

Дальность действия системы без накопления составляет ~ 2.8 км. Для достижения дальности $RL \approx 10$ км требуется энергетический выигрыш 25 – 27 дБ. Зависимость дальности от мощности и накопления аппроксимируется выражением:

$$R_{\max} \propto (P_{\text{ППМ}} \cdot M)^{1/4} \quad (4)$$

Требуемый выигрыш обеспечивается когерентным накоплением $M \approx 300 - 500$ кадров при мощности одного ППМ 0.5 – 1 Вт. Зависимость времени когерентного накопления T от мощности ППМ представлена на рис. 4.

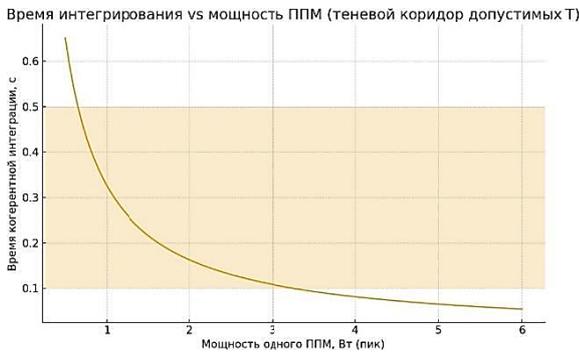


Рис. 4. Зависимость времени когерентного накопления T от мощности одного ППМ. Заштрихована зона допустимого окна когерентности (0,1–0,5 с)

На рис. 4 показано, что увеличение мощности ППМ выше 3 Вт снижает требуемое время интеграции до 0,1 с, однако практически не изменяет энергетические затраты на одно измерение – произведение $E_{DC} = P_{DC}T$ остаётся почти постоянным. Следовательно, оптимум выбирается по эксплуатационным соображениям: частоте обновления трассы и тепловому режиму усилителей.

В табл. 2 приведены основные расчетные параметры и характеристики распределённой воздушной АФАР, обеспечивающие обнару-

жение малозаметной цели на дальности до 10 км.

Таблица 2
 Параметры воздушной распределенной АФАР для обнаружения цели на 10 км

Параметр	Значение
Мощность одного ППМ $P_{\text{ППМ}}$	1.0 Вт
Число интегрируемых кадров M	400
Время когерентного накопления T	0.40 с
Энергия на одно измерение (группа из 4 БПЛА)	1.7 Дж

Из данных табл. 2 видно, что требуемая дальность достигается за счёт когерентного накопления при умеренной мощности приёмопередающих модулей и допустимом времени интеграции, что подтверждает энергетическую реализуемость предлагаемой конфигурации.

Для апертуры длиной $L = 15$ м угловая ширина ДН на уровне половинной мощности составляет $\Theta_{HP} \approx 0.88\lambda/L \approx 0.10^\circ$. Точность угловой оценки (в соответствии с приближением Крамера-Рао) определяется как:

$$\sigma_\theta \sim \frac{\Theta_{HP}}{2\sqrt{SNR}}, \quad \sigma_y \sim R \cdot \sigma_\theta \quad (5)$$

После когерентного накопления ($SNR \geq 25$ дБ) среднеквадратичная ошибка оценки координаты цели не превышает 0.5 м.

Анализ для воздушного базирования: Моделирование подтвердило возможность уверенного обнаружения малогабаритной цели с ЭПР 0.05 м^2 на расстояниях до 10 км. При этом точность оценки координат (0.5 м) существенно превосходит апертурное разрешение. Основные вызовы для воздушного сегмента – компенсация быстрых флуктуаций, вызванных турбулентностью, и обеспечение широкополосных каналов связи между БПЛА и центром обработки в реальном времени.

Методология ИИ-проектирования и мультидисциплинарной оптимизации

Математический аппарат, используемый для описания и оптимизации распределенных систем, находит прямые аналогии в современных архитектурах искусственного интеллекта. В частности, фундаментальный для данной работы процесс синтеза и компенсации фазовых ошибок в стохастической апертуре функционально близок к механизму внимания

(Attention), лежащему в основе нейросетей-трансформеров [5]. Если в нашей системе «внимание» алгоритма динамически фокусируется на цели, компенсируя фазовые искажения от случайно расположенных элементов, то в инженерном проектировании ИИ выступает в роли интеллектуального ассистента, направляющий вычислительные ресурсы на наиболее критичные и трудоемкие задачи.

Основные точки применения ИИ в проектировании сложных технических систем

1. Автоматизация инженерного анализа и поиска аналогов. ИИ-системы, оснащенные алгоритмами обработки естественного языка (NLP) и компьютерного зрения, способны проводить семантический поиск в патентных базах и технической документации, находить функциональные аналоги узлов и генерировать инженерный граф знаний [13, 14]. Это позволяет сократить время на предпроектный анализ на 50–70 %.

2. Ускорение численного моделирования. Для задач, требующих значительных вычислительных ресурсов (например, CFD- или EM-моделирование), ИИ позволяет строить surrogate-модели (метамодели), которые с высокой точностью аппроксимируют результаты дорогостоящих расчетов за доли секунды [15]. Это делает возможным проведение тысяч итераций оптимизации в сжатые сроки.

3. Автоматизация работы с проектной документацией. ИИ-модули, такие как OCR и LLM-парсеры, способны автоматически извлекать информацию из чертежей общего вида и спецификаций, контролируя их полноту и непротиворечивость. Другой пример – генерация «живой документации», автоматически синхронизируемой с цифровой моделью изделия [13].

4. Генеративное проектирование и мультидисциплинарная оптимизация (MDO). На этапе предварительного проектирования ИИ используется для генерации множества вариантов конструктивного исполнения, удовлетворяющих заданным техническим требованиям (ТТЗ). ИИ-алгоритм (на основе байесовской оптимизации) не только находит глобальный оптимум, но и позволяет визуализировать сложные, неочевидные зависимости между параметрами конструкции и выходными характеристиками.

Возможности MDAO продемонстрированы в процессе оптимизации конструкции гиросtabilизированного подвеса оптико-электронной системы (ОЭС), предназначенной для установки на одном из БПЛА роя [13]. Были одновременно оптимизированы механическая прочность конструкции, динамика системы стабилизации, тепловые режимы работы и массогабаритные показатели. На рис. 5 представлена карта чувствительности стабильности линии визирования (σ_{LOS}) гиросtabilизированного узла в пространстве параметров жесткости траверсы и передаточного числа редуктора. В результате удалось достичь улучшения стабильности линии визирования на 27 % при одновременном снижении массы узла на 15 % по сравнению с исходной конфигурацией.

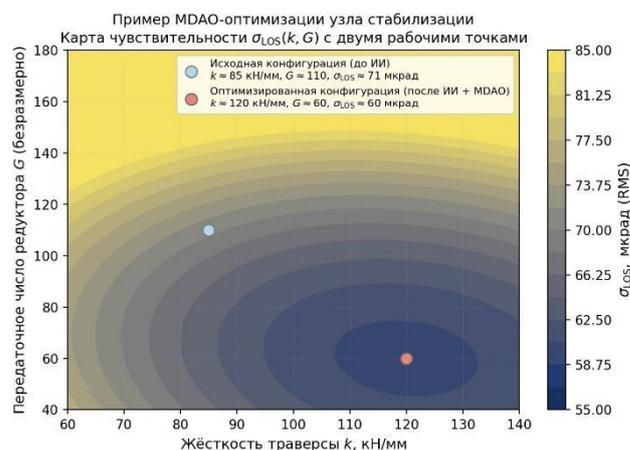


Рис. 5. Карта чувствительности стабильности

линии визирования σ_{LOS} гиросtabilизированного узла. Показаны исходная (до ИИ) и оптимизированная (после ИИ + MDAO) конфигурации в пространстве параметров жесткости траверсы (k) и передаточного числа редуктора (G)

В итоге, в ходе данного исследования ИИ-ассистент, созданный на базе GPT-архитектур, активно использовался для решения комплекса задач, что позволило ускорить работу примерно на 80 %. Его применение оказалось наиболее эффективным для:

- проведения первичного аналитического обзора и выявления технологических барьеров;
- выполнения рутинных инженерных расчетов и параметрических исследований;
- прототипирования алгоритмов компенсации фазовых ошибок;
- генерации кодов для моделирования и визуализации результатов.

Таким образом, симбиоз человеческой экспертизы и машинной эффективности подтверждает тезис о том, что современный ИИ выступает не как замена инженеру, а как мощный инструмент-мультипликатор, освобождающий специалиста для решения творческих и концептуальных задач.

Заключение

1. Проведенное исследование демонстрирует принципиальную возможность и практическую перспективность создания мобильных распределенных АФАР космического и воздушного базирования на основе принципа стохастического синтеза когерентной апертуры.

2. Детальный анализ выявил критические технологические барьеры: сверхточная синхронизация, управление динамическим роением, высокоскоростные каналы передачи данных и высокая производительность ВЦ. Для каждого из них существуют отработанные или перспективные пути решения, подтвержденные успешными практическими реализациями, такими как DARPA NTS-3, Lockheed Martin COHERENT SWARM SAR и архитектура NVIDIA Aerial [6, 11, 10].

3. Использование ИИ-ассистента на этапе проектирования доказало свою высокую эффективность как мультипликатор инженерного труда, освобождая специалиста для решения творческих задач. Применение методов MDAO и генеративного дизайна позволяет выявлять нетривиальные зависимости и находить близкие к оптимальным конструктивные решения [13, 15].

4. Несмотря на сложность, представленные результаты, подкрепленные анализом аппаратной реализуемости (на базе компонентов от Analog Devices, Xilinx, ublox и др. [9]), служат веским основанием для постановки опытно-конструкторских работ. Развитие данной концепции открывает путь к созданию нового поколения живучих, гибких и адаптивных систем радиолокации, связи и радиоэлектронной борьбы.

Дальнейшее развитие работы целесообразно направить на создание демонстрационных макетов, проведение натуральных экспериментов и разработку методик когерентной обработки данных в условиях движения роя. В частности, следующим шагом в развитии концепции может стать создание наземного демонстрационного макета изделия. На сегодняшний день для этого имеются отработанные

конструктивно-технологические решения подрешеток X-диапазона [16].

Результаты настоящей работы могут служить методологической основой для постановки научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов в интересах Министерства обороны и предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Авторы приглашают исследовательские организации и промышленные предприятия к сотрудничеству в рамках разработки и экспериментальной верификации прототипа стохастической цифровой АФАР, ориентированной на задачи обнаружения, сопровождения и целеуказания.

Литература

1. Журавлёв С.Г., Соколов А.В. Цифровые антенные решётки в радиолокации: современное состояние и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. № 8. С. 45-59.
2. Space HAUC: A Mission to Demonstrate High-Rate Science Data Downlink Using a Software-Defined CubeSat with a Phased Array Antenna / J.K. Nguyen, S.G. Razdan [et al.] // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2021. P. 1-10.
3. Бавижев М.Д., Рахманов А.А. Мобильная воздушная активная фазированная антенная решетка на базе БПЛА: концепция, моделирование и прототипирование // Научный Вестник ОПК России. 2025. № 4. С. 39-47.
4. Рахманов А.А., Бавижев М.Д. Распределенная АФАР с синтезированной стохастической апертурой на базе роя малых космических аппаратов // Известия РАН. 2025. № 4. С. 23-31.
5. Attention is All You Need / A. Vaswani [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017). 2017. P. 5998-6008. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (дата обращения: 12.03.2024).#
6. U.S. Air Force Research Laboratory. NTS-3 Program Overview. Technical Report. 2021. P. 1-32. URL: <https://www.afrl.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Display/Article/2567494/nts-3-navigation-technology-satellite-3/> (дата обращения: 02.02.2026).
7. Airbus Defence & Space. R&T Brief: Distributed Aperture and Swarm Technologies. Technical Report. 2021. P. 1-18. URL: <https://www.airbus.com/en/innovation/defence-and-space-research> (дата обращения: 02.02.2026).
8. Brown A., Clark J. High-precision navigation and positioning for UAV swarms // Journal of Navigation. 2022. Vol. 75. No. 2. P. 345-362.
9. Analog Devices. Application Note AN-2039: JESD204B/C System Design Guidelines. 2020. P. 1-28. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-2039.pdf> (дата обращения: 02.02.2026).
10. Lockheed Martin. Coherent Swarm SAR Concepts // AIAA SciTech Conference Proceedings. 2022. P. 1-12. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2022-1234> (дата обращения: 02.02.2026).
11. NVIDIA. NVIDIA Aerial SDK: Technical report. 2023. URL: <https://docs.nvidia.com/aerial/archive/aerial-sdk/23-1/index.html> (дата обращения: 07.06.2025).

12. Коновалов А.Б., Семёнов А.С., Петров В.М. Синхронизация и позиционирование в группе беспилотных аппаратов с использованием GPSDO и радиоканальной коррекции // *Электросвязь*. 2020. № 5. С. 45-51.

13. Бавижев М.Д. Анализ взаимного влияния устойчивости воздушной активной фазированной антенной решётки на базе роя БПЛА // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2025. Т. 25. № 4. С. 21-35.

14. Смирнов Е.В. Семантические технологии и искусственный интеллект в инженерном поиске // *Инфор-*

мационные технологии в проектировании и производстве. 2024. № 2. С. 28–35.

15. Deep Learning for Surrogate Modeling of Computational Electromagnetics / Z Wang [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2023. Vol. 71. No. 5. P. 4122–4135.

16. Приемопередающий модуль X-диапазона на кремниевой коммутационной плате / Е.Ю. Котляров [и др.] // *Наноиндустрия*. 2018. Т. 82. № S5. С. 441–442. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.441.442> (дата обращения: 21.05.2023).

Поступила 14.01.2026; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Бавижев Михаил Данильевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, вице-президент, директор НИЦ АО «Научно-производственное предприятие «РАДИЙ» (125057, Россия, г. Москва, ул. Часовая, 28), e-mail: mbavizhev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3074-5591

Рахманов Александр Алексеевич – академик РАН, д-р техн. наук, профессор, генерал-лейтенант, советник ген. директора МАК «Вымпел» (125480, Россия, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, 10, корп. 1), e-mail: al.al.rahmanov@gmail.ru

Слюсарев Геннадий Васильевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник департамента науки, профессор департамента строительной инженерии и прототипирования института перспективной инженерии Северо-Кавказского федерального университета (355029, Россия, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2, корп. 9), e-mail: gsliusarev@ncfu.ru, ORCID: 0000-0002-7947-7682

Conceptual design of a distributed stochastic antenna array on small unmanned aerial vehicles

M.D. Bavizhev¹, A.A. Rakhmanov², G.V. Slyusarev³

¹Research and Production Enterprise «РАДИЙ», Moscow, Russia

²Interstate Joint Stock Corporation «Vympel», Moscow, Russia

³North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Abstract. This paper examines the concept of distributed active phased antenna arrays formed from swarms of small air- and space-based unmanned aerial vehicles. The proposed approach is based on the principle of stochastic aperture synthesis, in which a large virtual antenna is formed by spatially distributing antenna elements on moving carriers, followed by digital compensation for phase and time distortions. Coherence of radiation and reception is ensured not by rigid geometric construction of the array, but by iterative processing of I/Q signals, taking into account the current relative positions of the elements and positioning errors. A set of mathematical models is presented describing the formation of the radiation pattern, coherent signal accumulation, and the influence of stochastic disturbances on the system's characteristics. Parametric analysis and numerical modeling are performed for air- and space-based scenarios, allowing for an assessment of the energy potential, angular resolution, and resilience to losses of individual swarm elements. Special attention is given to key technological aspects of implementation: ultra-precise time and frequency synchronization, swarm control, high-speed data transmission, and computing performance requirements. The feasibility of using artificial intelligence methods for multidisciplinary optimization of the system architecture and acceleration of design processes is demonstrated.

Key words: AESA; aperture synthesis; UAV swarm; unmanned aerial vehicle (UAV); artificial intelligence (AI); synchronization; phase compensation

References

1. Zhuravlev S.G., Sokolov A.V. “Digital antenna arrays in radar: Current state and prospects”, *Advances in Modern Radio Electronics (Uspekhi Sovremennoy Radioelektroniki)*, 2022, no. 8, pp. 45-59.
2. Nguyen J.K., Razdan S.G. et al. “Space HAUC: A mission to demonstrate high-rate science data Downlink using a software-defined CubeSat with a phased array antenna”, *Proc. of the IEEE Aerospace Conf.*, 2021, pp. 1-10, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9438409> (date of access: 02.02.2026).
3. Bavizhev M.D., Rakhmanov A.A. “Mobile airborne active phased array antenna based on a UAV swarm: Concept, modeling, and prototyping”, *Scientific Bulletin of Russian Defense-Industrial Complex (Nauchnyy Vestnik OPK Rossii)*, 2025, no. 4, pp. 39-47.
4. Rakhmanov A.A., Bavizhev M.D. “Distributed active phased array with synthesized stochastic aperture based on a small spacecraft swarm”, *News of RARAN (Izvestiya PAPAN)*, 2025, no. 4, pp. 23–31.

5. Vaswani A. et al. “Attention is all you need”, *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 2017, pp. 5998–6008, available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (date of access: 12.03.2024).
6. U.S. Air Force Research Laboratory (AFRL). NTS-3 Program Overview: Technical report, 2021, pp. 1-32, available at: <https://www.afrl.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Display/Article/2567494/nts-3-navigation-technology-satellite-3/> (date of access: 02.02.2026).
7. Airbus Defence & Space. R&T Brief: Technical report, 2021, pp. 1-18, available at: <https://www.airbus.com/en/innovation/defence-and-space-research> (date of access: 02.02.2026).
8. Brown A., Clark J. “High-precision navigation and positioning for UAV swarms”, *Journal of Navigation*, 2022, vol. 75, no. 2, pp. 345–362.
9. Analog Devices. Application Note AN-2039: Technical report, 2020, pp. 1–28, available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-2039.pdf> (date of access: 02.02.2026).
10. Lockheed Martin. Coherent Swarm SAR Concepts, AIAA SciTech Conference, 2022, pp. 1–12, available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2022-1234> (date of access: 02.02.2026).
11. NVIDIA. NVIDIA Aerial SDK: Technical report, 2023, available at: <https://docs.nvidia.com/aerial/archive/aerial-sdk/23-1/index.html> (date of access: 07.06.2025).
12. Konovalov A.B., Semenov A.S., Petrov V.M. “Synchronization and positioning in a group of unmanned vehicles using GPSDO and radio channel correction”, *Telecommunications (Elektrosvyaz)*, 2020, no. 5, pp. 45–51.
13. Bavizhev M.D., Rakhmanov A.A. ‘Application of artificial intelligence systems in engineering research: A scientifically grounded response to skeptics’, *Reports of AMAN (Doklady AMAN)*, 2026, no. 1(1), in press.
14. Smirnov E.V. “Semantic technologies and artificial intelligence in engineering search”, *Information Technologies in Design and Production (Informatsionnye Tekhnologii v Proektirovanii i Proizvodstve)*, 2024, no. 2, pp. 28–35.
15. Wang Z. et al. “Deep learning for surrogate modeling of computational electromagnetics”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, vol. 71, no. 5, pp. 4122–4135.
16. Kotlyarov E.Yu., Panasenko P.V., Volosov A.V., Bavizhev M.D. “X-band transceiver module on a silicon interposer”, *Nanoindustry*, 2018, no. 82(S5), pp. 441–442, available at: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.441.442> (date of access: 21.05.2025)

Submitted 14.01.2026; revised 01.02.2026

Information about the authors

Mikhail D. Bavizhev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Laureate of the State Prize of the Russian Federation. Vice President, Director of the Research Center of JSC «Research and Production Enterprise «RADII» (28 Chasovaya str., Moscow 125057, Russia), e-mail: mbavizhev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3074-5591

Aleksandr A. Rakhmanov, RARAN Academician/Dr. Sci. (Technical), Professor, Lieutenant General. Advisor to the General Director of IJSC «Vypel» (10, Bld. 1, Geroev Panfilovtsev str., Moscow 125480, Russia), e-mail: al.al.rahmanov@gmail.ru

Gennadiy V. Slyusarev, Dr. Sci. (Technical), Leading Research Scientist of the Science Department, Professor, Department of Civil Engineering and Prototyping, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Bld. 9, Kulakova ave., Stavropol 355029, Russia), e-mail: gslusarev@ncfu.ru, ORCID: 0000-0002-7947-7682

Разработка и исследование системы тактильной векторной навигации на основе квадрополярного вибромоторного интерфейса

О.Н. Чирков, А.П. Коробкин, М.С. Ковалев, В.А. Дарашкевичюс

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается задача повышения автономности и эффективности пространственной ориентации лиц с глубокими нарушениями зрения. Показано, что существующие тактильные навигационные системы преимущественно используют дискретные подсказки направления, что приводит к увеличению когнитивной нагрузки и снижению точности следования маршруту. Предложен метод тактильной векторной навигации, основанный на формировании непрерывного тактильного векторного поля с использованием квадрополярного вибромоторного интерфейса. Разработана архитектура носимого устройства и математическая модель преобразования углового рассогласования ориентации пользователя и целевого направления в сигналы управления вибромоторами. Данная модель обеспечивает преобразование углового рассогласования между ориентацией пользователя и целевым направлением в пропорциональные сигналы управления четырьмя вибромоторами, создавая интуитивное ощущение «тянущего» направления. Проведено имитационное моделирование и экспериментальная верификация прототипа. Результаты показали статистически значимое повышение точности следования маршруту на 15–20 % и снижение количества остановок на 22% по сравнению с системами бинарных тактильных команд. Полученные результаты подтверждают научную новизну и практическую значимость предложенного подхода для ассистивных навигационных систем. Работа вносит вклад в развитие ассистивных технологий, предлагая практико-ориентированное, научно обоснованное решение для улучшения качества жизни незрячих и слабовидящих людей, а также открывает перспективы для применения в других областях человеко-машинного взаимодействия.

Ключевые слова: тактильная навигация; ассистивные технологии; вибромоторный интерфейс; пространственная ориентация; тактильное кодирование; незрячие и слабовидящие

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

Введение

Обеспечение мобильности и самостоятельной пространственной ориентации для людей с нарушениями зрения (НИЗ) остается одной из актуальных междисциплинарных проблем, находящейся на стыке реабилитологии, приборостроения, эргономики и human-computer interaction [1]. Традиционные средства, такие как белая трость или собака-поводырь, эффективны для локального обнаружения препятствий, но не предоставляют информации о глобальном направлении движения, необходимой для уверенной навигации в незнакомой среде [2].

Современные электронные навигационные ассистивные системы для НИЗ можно условно разделить на две крупные группы, основанные на разных сенсорных модальностях. Первую группу составляют аудионавигационные решения, которые используют голосовые инструкции, синтезируемые на основе данных

глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) [3]. К их числу относятся широко распространенные приложения в смартфонах. Однако ключевым недостатком таких систем является перегрузка слухового канала, который для незрячих пользователей является критически важным для восприятия окружающей обстановки, оценки расстояний и обнаружения потенциальных угроз. Конкуренция между навигационными подсказками и окружающими звуками может дезориентировать пользователя и создать опасные ситуации.

Вторую группу представляют тактильные навигационные устройства, которые передают информацию о направлении движения через вибрационные стимулы [4]. Такие системы, в теории, позволяют разгрузить слуховой канал. Однако, как показал анализ существующих разработок, большинство из них реализуют простейшую логику дискретных команд, таких как «вибрировать слева» для поворота налево или «вибрировать справа» для поворота направо [5]. Подобный бинарный подход не передает пользователю информацию о величине углового отклонения от требуемого курса, что

приводит к необходимости серии пробных корректировок движения. В результате траектория пользователя становится зигзагообразной, увеличивается количество остановок для уточнения направления, а общая эффективность и скорость навигации снижаются.

Проведенный обзор литературы выявил пробел в области тактильного кодирования пространственной информации. Существует потребность в методах, обеспечивающих не просто дискретное указание направления, а непрерывное, интуитивно понятное тактильное представление вектора движения, которое позволило бы пользователю чувствовать не только сторону, но и степень отклонения от курса. Некоторые исследования указывают на потенциал использования распределенных массивов тактильных актуаторов (тактильных дисплеев) для передачи более сложной про-

странственной информации, однако такие решения часто оказываются громоздкими, энергоемкими и сложными в калибровке для повседневного использования.

Таким образом, научная проблема заключается в отсутствии формализованного и технически реализуемого метода тактильного кодирования пространственного вектора направления, который обеспечивал бы его непрерывное и интуитивное восприятие без перегрузки основных сенсорных каналов пользователя.

Целью данного исследования является разработка и экспериментальная верификация метода тактильной векторной навигации, основанного на формировании непрерывного тактильного векторного поля с помощью компактного квадрополярного вибромоторного интерфейса.



Рис. 1. Архитектура системы

Архитектура системы

Предлагаемая система тактильной векторной навигации представляет собой распределенную аппаратно-программную платформу, состоящую из двух основных компонентов: мобильного устройства (смартфона) и носимого тактильного интерфейса, выполненного в виде браслета. Архитектура системы раз-

делена на пять функциональных уровней (рис. 1):

1. Навигационный уровень. Реализуется на мобильном устройстве с использованием ГНСС (GPS/ГЛОНАСС). На этом уровне происходит определение текущих координат пользователя, построение оптимального маршрута до заданной точки назначения с помощью картографического API (например,

OpenStreetMap) и непрерывное вычисление целевого азимута движения – угла между направлением на север и вектором от текущего местоположения пользователя к следующей путевой точке маршрута.

2. Уровень ориентации. Реализуется в носимом устройстве, оснащенном инерциальным измерительным модулем (IMU), ключевым элементом которого для данной задачи является магнитометр (датчик магнитного поля Земли). Этот уровень отвечает за определение текущего азимута ориентации корпуса пользователя. Для компенсации шумов и магнитных помех данные с магнитометра обрабатываются с помощью калибровочных алгоритмов и комплементарного фильтра, совмещающего данные с акселерометра и гироскопа.

3. Уровень тактильного преобразования. Это центральный вычислительный уровень, реализуемый на микроконтроллере носимого устройства. Его задача – на основе текущего и целевого азимуты вычислить управляющие сигналы для вибромоторов.

4. Исполнительный уровень. Состоит из четырех вибродвигателей размещенных в корпусе браслета квадрополярно: на внутренней стороне запястья (N – север), внешней стороне (S – юг), левом боку (W – запад) и правом боку (E – восток) относительно условной системы координат пользователя. Микроконтроллер формирует ШИМ-сигналы, пропорциональные рассчитанным интенсивностям вибрации, которые подаются на драйверы моторов.

5. Уровень безопасности (опциональный). Для повышения безопасности может быть интегрирован дополнительный ультразвуковой или инфракрасный дальномер, обнаруживающий препятствия на пути пользователя. При обнаружении препятствия система может генерировать аварийный тактильный сигнал (например, синхронную высокочастотную вибрацию всех моторов), перекрывающий навигационные подсказки.

Связь между мобильным и носимом устройством осуществляется по беспроводному каналу BLE (Bluetooth Low Energy), что обеспечивает необходимую скорость обмена данными и низкое энергопотребление.

Математическая модель

1) Вычисление углового рассогласования. Пусть α_{target} – целевой азимут направления движения, а $\alpha_{current}$ – текущий азимут ориентации

пользователя. Угловое рассогласование (ошибка курса) вычисляется как разность:

$$\Delta\alpha = \alpha_{target} - \alpha_{current}, \Delta\alpha \in [-\pi, \pi]. \quad (1)$$

Для приведения значения к диапазону радиан (от -180° до $+180^\circ$) используем операцию «заворачивания» угла (*wrap*), которая эквивалентна функции $atan2(\sin(\Delta\alpha), \cos(\Delta\alpha))$:

$$\Delta\alpha = wrap(\alpha_{target} - \alpha_{current}) \Delta\alpha \in [-\pi, \pi]. \quad (2)$$

Положительное значение функции указывает, что целевое направление находится справа от текущей ориентации пользователя (требуется поворот направо), отрицательное – слева.

2) Проекция на тактильные оси. Для формирования тактильного векторного поля используется проекция единичного вектора направления на ортогональные оси тактильного интерфейса (рис. 2):

$$\vec{u} = (\cos \Delta\alpha, \sin \Delta\alpha) \quad (3)$$

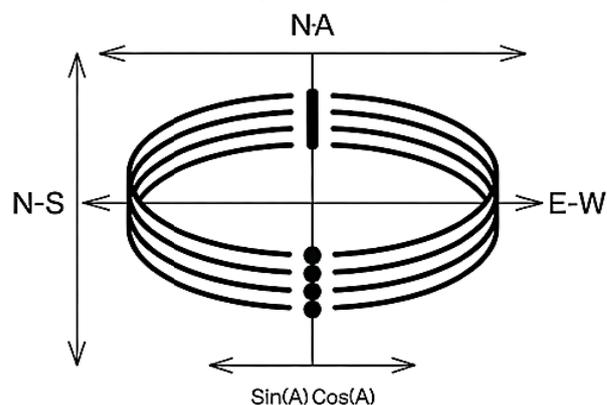


Рис. 2. Формирование тактильного векторного поля на основе проекции вектора направления

3) Преобразование в интенсивности вибрации. Чтобы создать ощущение «тянущего» вектора, вибромоторы должны активироваться только с той стороны, куда «указывает» соответствующая проекция вектора \vec{u} . Для этого проекции разделяются на положительные и отрицательные компоненты, каждая из которых назначается своему мотору.

Для оси «Север-Юг»:

- Вибромотор N (север) активируется, если вектор направления имеет северную компоненту ($u_x > 0$).

- Вибромотор S (юг) активируется, если вектор направления имеет южную компоненту ($u_x < 0$).

$$I_N = K \cdot \max(0, \cos \Delta\alpha),$$

$$I_S = K \cdot \max(0, -\cos \Delta\alpha), \quad (4)$$

где K - коэффициент нормализации, определяющий максимальную интенсивность вибрации.

Для оси «Восток-Запад»:

- Вибромотор E (восток) активируется, если вектор направления имеет восточную компоненту ($u_y > 0$).

- Вибромотор W (запад) активируется, если вектор направления имеет западную компоненту ($u_y < 0$).

$$I_E = K \cdot \max(0, \sin \Delta\alpha),$$

$$I_W = K \cdot \max(0, -\sin \Delta\alpha). \quad (5)$$

4) Интерпретация тактильного ощущения.

При $\Delta\alpha = 0$ (пользователь смотрит точно на цель) $\cos\{0\}=1$, $\sin\{0\}=0$. Следовательно, $I_N = K$, $I_S = I_E = I_W = 0$. Пользователь чувствует постоянную вибрацию только на «севере» браслета (вперед), что означает - двигайся прямо.

При $\Delta\alpha = 90^\circ$ (цель справа), $\cos\{90^\circ\}=0$, $\sin\{90^\circ\}=1$. Тогда $I_E = K$, остальные моторы выключены. Пользователь чувствует вибрацию только на «востоке» браслета (справа), что означает - цель строго справа.

При $\Delta\alpha = 45^\circ$, $\cos\{45^\circ\}=\sin\{45^\circ\} \sim 0,707$. Тогда $I_N=I_E \sim 0,707$. Пользователь чувствует одновременную вибрацию спереди и справа, причем одинаковой силы. Это создает четкое тактильное ощущение вектора, направленного на северо-восток, побуждая пользователя плавно повернуть направо, но не полностью, а ровно на 45 градусов.

Таким образом, алгоритм обеспечивает непрерывное и аналоговое тактильное представление вектора ошибки курса.

Алгоритм работы системы

Алгоритм управления тактильным интерфейсом работает в реальном времени по следующей схеме (рис. 3):

1. Старт. Инициализация сенсоров, моторов и беспроводного соединения.

2. Получение данных. Прием α_{target} от мобильного устройства и чтение $\alpha_{current}$ с магнитометра.

3. Вычисление рассогласования. Расчет $\Delta\alpha$ с применением функции *wrap*.

4. Расчет проекций. Вычисление $\cos \Delta\alpha$, $\sin \Delta\alpha$.

5. Нормирование и ограничение. Расчет по формулам (4, 5).

6. Применение сигналов. Формирование ШИМ-сигналов для каждого вибромотора в соответствии с рассчитанными интенсивностями.

7. Задержка и цикл. Выдерживание временного интервала обновления (например, 100 мс) и возврат к шагу 2.

Моделирование

Для оценки эффективности предложенного метода тактильной векторной навигации было проведено двухэтапное исследование: имитационное моделирование в виртуальной среде и натурный эксперимент с физическим прототипом.

Проведено имитационное моделирование в ROS/Gazebo. Среда Robot Operating System (ROS) и симулятор Gazebo были использованы для создания контролируемых и воспроизводимых условий тестирования. Была разработана модель открытого пространства размером 100x100 м. В симуляции участвовало 20 виртуальных агентов, каждый из которых представлял собой модель пользователя с кинематикой, подобной человеческой (максимальная скорость 1,4 м/с, ограничения на угловую скорость поворота). Навигационная логика была реализована в виде ROS-нод на Python.

Алгоритм для Системы А (векторное поле). Для каждого агента вычислялся $\Delta\alpha$ между его текущим курсом и направлением на целевую точку, расположенную в 100 м от старта. Интенсивности вибрации рассчитывались по формулам (1-5). Поворот агента моделировался как пропорциональное управление. Угловая скорость поворота задавалась пропорциональной разности интенсивностей моторов слева и справа. Это имитировало интуитивную реакцию пользователя на тактильный стимул.

Алгоритм для Системы В (дискретные команды). Реализована классическая логика бинарных подсказок. Если $\Delta\alpha < 5^\circ$, активировался мотор «Север» (движение прямо). Если $\Delta\alpha > 5^\circ$, активировался мотор «Восток» (поворот направо) до тех пор, пока ошибка не становилась меньше порога. Аналогично для левого поворота. Это приводило к релейному, «ступенчатому» поведению агента.

Каждый агент стартовал с одинаковым начальным отклонением курса в 30° от идеального направления на цель. Измерялись три ключевые метрики:

1) среднее линейное отклонение (СО) от идеальной прямой траектории, вычисляемое как интеграл перпендикулярного расстояния;

2) количество полных остановок (скорость меньше 0,1 м/с), вызванных неопределенностью в направлении;

3) общее время прохождения маршрута.

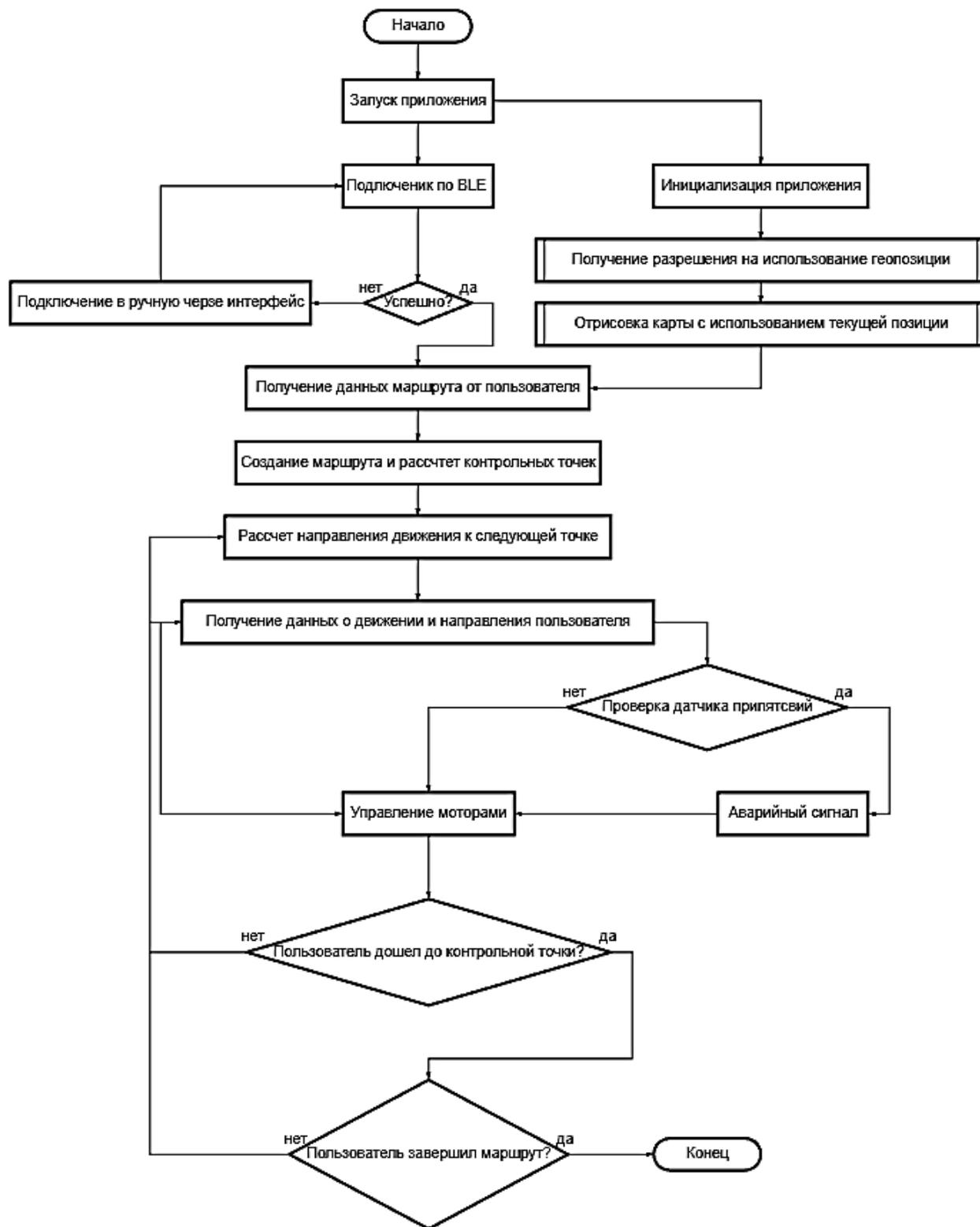


Рис. 3. Алгоритм

Результаты моделирования

В качестве метрик эффективности использовались среднее отклонение от идеальной траектории, количество полных остановок и среднее время достижения цели.

Статистическая значимость различий проверялась с помощью t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Для всех трех метрик было получена вероятность $p < 0.05$, что подтверждает статистическую значимость преимуществ Системы А. Результаты имитационного эксперимента представлены в табл. 1.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что непрерывное тактильное представление вектора направления снижает когнитивную нагрузку пользователя и повышает устойчивость траектории движения. Пользователи демонстрировали более плавную коррекцию курса и реже прибегали к полным остановкам для уточнения направления.

Таблица 1

Показатель	Система А	Система В
Среднее отклонение, м	1.20±0.15	1.50±0.18
Количество остановок	3.1±0.6	4.0±0.7
Время прохождения, с	138±12	154±15

Для валидации результатов симуляции был собран физический прототип носимого устройства (рис. 4) на базе микроконтроллера ESP32, IMU MPU9250 (с магнитометром) и четырех линейных резонансных вибромоторов (LRA), размещенных на напечатанном на 3D-принтере браслете [6, 7]. Печатная плата устройства спроектирована на основе [8]. В эксперименте участвовало 10 добровольцев (с завязанными глазами для имитации условий глубокого нарушения зрения). Маршрут длиной 50 м с одним изменением направления на 60° был размечен на открытой площадке.

Каждый участник проходил маршрут дважды: с Системой А и Системой В (порядок рандомизирован). Фиксировались те же метрики, что и в симуляции, с помощью внешней системы наблюдения и логгирования данных с устройства.

Результаты подтвердили тенденции, выявленные при моделировании:

- Точность: Среднее отклонение от маршрута снизилось с 1.55 м (Система В) до 1.25 м (Система А), что соответствует улучшению на 19,4 %.

- Количество остановок: Уменьшилось с 4,3 до 3,3 в среднем на маршрут, что составляет снижение на 23.3 %.



Рис. 4. Модель браслета

Заключение

Разработан, смоделирован и экспериментально исследован метод тактильной векторной навигации для лиц с глубокими нарушениями зрения. Метод основан на формировании непрерывного тактильного векторного поля с помощью квадрополярного вибромоторного интерфейса, что обеспечивает интуитивное восприятие не только стороны, но и величины отклонения от целевого курса.

Теоретической основой метода является математическая модель, преобразующая угловое рассогласование между ориентацией пользователя и целевым направлением в пропорциональные интенсивности вибрации четырех моторов, расположенных по сторонам света. Это создает устойчивую иллюзию «тянущего» тактильного вектора, направляющего пользователя.

Комплексная экспериментальная проверка, включавшая имитационное моделирование в ROS/Gazebo и натурные испытания с участием добровольцев, доказала статистически значимое превосходство предложенного подхода над традиционными системами, использующими бинарные тактильные команды. Полученный выигрыш был количественно оценен по ключевым метрикам:

Точность следования маршруту повысилась на 15–20 % (уменьшение среднего линейного отклонения). Количество вынужденных остановок для уточнения направления сократилось на 22–23 %.

Предложенное решение обладает высокой практической значимостью и может быть непосредственно интегрировано в ассистивные навигационные системы, носимые человеко-машинные интерфейсы, а также найти применение в других областях, где требуется тактильное указание направления (например, в системах дополненной реальности для пожарных или спелеологов). Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция с системами компьютерного зрения для навигации в помещениях без GPS, адаптация алгоритма под индивидуальные особенности тактильного восприятия пользователей и проведение долгосрочных клинических испытаний с целевой группой.

Литература

1. Giudice N.A., Legge G.E. Blind navigation and the role of technology // *The engineering handbook of smart technology for aging, disability, and independence*. 2008. Vol. 8. pp. 479-500.
2. Velázquez R. Wearable assistive devices for the blind // *Wearable and Autonomous Biomedical Devices and Systems for Smart Environment*, Berlin, Heidelberg. 2010. pp. 331-349.
3. Augmented white cane with multimodal haptic feedback / S. Gallo [et al.] // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2011. pp. 149-154.
4. Tactile wayfinder: A non-visual support system for wayfinding / W. Heuten [et al.] // *5th Nordic conference on Human-computer interaction: building bridges*. 2008. pp. 172-181.
5. Pielot M., Boll S. Tactile wayfinder: comparison of tactile waypoint navigation with commercial pedestrian navigation systems // *International Conference on Pervasive Computing*, Berlin, Heidelberg. 2010. pp. 76-93.
6. Разработка тактильного навигационного браслета на основе микроконтроллера ESP32 для людей с нарушениями зрения / О.Н. Чирков, В.А. Дарашкевичюс, А.П. Коробкин, М.С. Ковалев // *Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет*, 2025. С. 116-118.
7. Разработка мобильного приложения для тактильного навигационного устройства на основе Flutter / О.Н. Чирков, В.А. Дарашкевичюс, А.П. Коробкин, М.С. Ковалев // *Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет*, 2025. С. 112-115.
8. Чирков О.Н., Костюков А.С., Хрипунков А.П. Методика проектирования печатных плат для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2025. Т. 21. № 3. С. 163-173. DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.3.022.

Поступила 25.01.2026; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2250-2100
Коробкин Александр Павлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: b1ge1eph4nt@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2113-5380
Ковалев Максим Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: M_k_24@mail.ru, ORCID: 0009-0008-3966-7001
Дарашкевичюс Владислав Андрюсович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vladosd23s@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6186-9167

Development and research of a tactile vector navigation system based on a quadropolar vibration motor interface

O.N. Chirkov, A.P. Korobkin, M.S. Kovalev, V.A. Darashkevicius

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The problem of increasing the autonomy and effectiveness of spatial orientation of persons with profound visual impairments is considered. It is shown that existing tactile navigation systems predominantly use discrete direction hints, which leads to an increase in cognitive load and a decrease in route accuracy. A method of tactile vector navigation based on the formation of a continuous tactile vector field using a quadropolar vibration motor interface is proposed. The architecture of a wearable device and a mathematical model for converting the angular misalignment of user orientation and target direction into vibration motor control signals have been developed. This model provides the transformation of the angular alignment between the user's orientation and the target direction into proportional control signals of four vibration motors, creating an intuitive feeling of "pulling" direction. Simulation modeling and experimental verification of the prototype were carried out. The

results showed a statistically significant increase in route accuracy by 15-20% and a 22% reduction in the number of stops compared to binary tactile command systems. The results obtained confirm the scientific novelty and practical significance of the proposed approach for assistive navigation systems. The work contributes to the development of assistive technologies by offering a practice-oriented, scientifically based solution to improve the quality of life of blind and visually impaired people, as well as opens up prospects for application in other areas of human-machine interaction.

Key words: tactile navigation; assistive technologies; vibration motor interface; spatial orientation; tactile coding; blind and visually impaired

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002).

References

1. Giudice N.A., Legge G.E. "Blind navigation and the role of technology", *The engineering handbook of smart technology for aging, disability, and independence*, 2008, vol. 8, pp. 479-500.
2. Velázquez R. "Wearable assistive devices for the blind", *Wearable and Autonomous Biomedical Devices and Systems for Smart Environment*, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 331-349
3. Gallo S. et al. "Augmented white cane with multimodal haptic feedback", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011, pp. 149-154.
4. Heuten W. et al. "Tactile wayfinder: A non-visual support system for wayfinding", *5th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Building Bridges*, 2008, pp. 172-181.
5. Pielot M., Boll S. "Tactile wayfinder: comparison of tactile waypoint navigation with commercial pedestrian navigation systems", *Int. Conf. on Pervasive Computing*, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 76-93.
6. Chirkov O.N., Darashkevicius V.A., Korobkin A.P., Kovalev M.S. "Development of a tactile navigation wristband based on the ESP32 microcontroller for people with visual impairments", *Collection of scientific papers: Problems of Ensuring Reliability and Quality of Devices and Systems (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem)*, Voronezh State Technical University, 2025, pp. 116-118.
7. Chirkov O.N., Darashkevicius V.A., Korobkin A.P., Kovalev M.S. "Development of a mobile application for a tactical navigation device based on Flutter", *Collection of scientific papers: Problems of Ensuring Reliability and Quality of Devices and Systems (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem)*, Voronezh State Technical University, 2025, pp. 112-115.
8. Chirkov O.N., Kostyukov A.S., Khripunkov A. P. "Design methodology of printed circuit boards for working with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 163-173.

Submitted 25.01.2026; revised 01.02.2026

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: 000-0003-2250-2100

Aleksandr P. Korobkin, student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: b1ge1eph4nt@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2113-5380

Maksim S. Kovalev, student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: M_k_24@mail.ru, ORCID: 0009-0008-3966-7001

Vladislav A. Darashkevicius, student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vladod23s@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6186-9167

Антенные решетки с механическим широкоугольным сканированием для аппаратуры передачи энцефалограмм и кардиограмм операторов

Д.В. Журавлев¹, Д.К. Проскурин¹, Ю.Г. Пастернак¹, Н.Б. Смольянов^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Концерн “Созвездие”», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Представлены две модели антенных решеток на основе прямоугольных волноводов, обладающих П-образным профилем, заполненным воздухом. Рассматриваемые варианты антенной решетки могут быть использованы в системах спутниковой связи и в устройствах глобальных навигационных спутниковых систем для аппаратуры, обеспечивающих передачу энцефалограмм и кардиограмм операторов. Ряды патч-излучателей располагаются на узкой стороне прямоугольного волновода и имеют Г-образную форму. Альтернативная модель имеет круглые патч-элементы, а также обладает возможностью смещения поликоровой пластины с помощью пьезоэлектрического или электромагнитного движителя. Для двух моделей антенных решеток произведено электродинамическое моделирование в программе CST Studio Suite 2025. В результате моделирования получены параметры разработанной антенны, такие как зависимость S – параметра антенны от частоты, коэффициент стоячей волны (КСВН) на входе антенны; коэффициенты отражения; рассчитана номограмма Вольперта-Смита на входе антенны. Построенные графики, демонстрирующие диаграммы направленности на частотах 10.7 ГГц, 12 ГГц, 13 ГГц и 14.5 ГГц. Конструкция антенной решетки позволяет смещать направление главного луча в зависимости от положения поликоровой пластины внутри волновода. Коэффициент направленного действия антенных решеток имеет уровень выше 16.8 dBi. Проведено сравнение их основных характеристик в полосе рабочих частот от 10.7 ГГц до 14.5 ГГц Ku-диапазона спутниковой связи.

Ключевые слова: П-образный волновод; патч-излучатели; линейные антенные решетки; Ku-диапазон

Введение

В настоящее время одним из наиболее востребованных направлений развития антенных систем являются устройства применимые в системах спутниковой связи и глобальных навигационных спутниковых система (ГНСС). При этом получают активное развитие в данном направлении сразу несколько направлений антенной техники [1-4].

Одними из наиболее распространенных антенн являются микрополосковые антенны, имеющие прямоугольную топологию, однако они обладают серьезным недостатком в виде узкой полосы частот [5].

Исследование линейной решетки

В процессе работы проводились исследования линейных решеток, выполненных на основе П-образного волновода. Параметры моделей прошли оптимизацию для обеспечения наилучших характеристик излучения в полосе частот от 10,7 ГГц до 14,5 ГГц. На рис. 1 приводится вид линейной решетки с Г-образными патч-излучателями.

В работе проводилось исследование варианта конструкции волновода, выполненного в виде линейной решетки. Параметры конструкции устройства рассчитывались для работы в полосе частот от 10.5 ГГц до 14.7 ГГц. Электромагнитное моделирование структурной конструкции антенн было проведено в программе CST Studio Suite 2025. На рис. 1 приводится конструкция исследуемой линейной решетки на основе волновода.

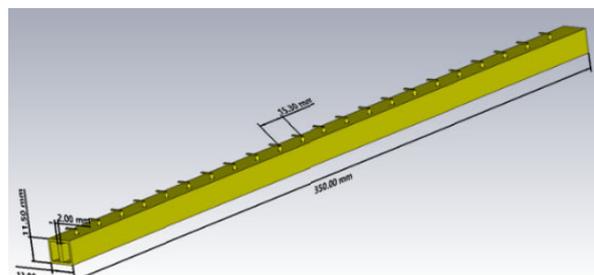


Рис. 1. Модель линейной антенной решетки с патч-излучателями

Внутреннее сечение волновода $11 \times 9.5 \text{ мм}^2$. К широкой стенке припаяна медная пластина шириной 2 мм и высотой 8.5 мм (остается зазор 1 мм между противоположной широкой стенкой и медной пластиной). Электрическое поле концентрируется в щели между пластиной и широкой стенкой. На рис. 2 приведено изобра-

жение волновода с торца, для демонстрации внутреннего строения.

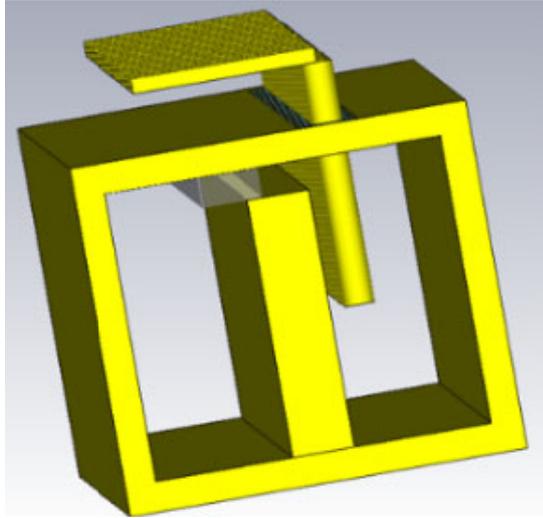


Рис. 2. П-образный профиль волновода, заполненного воздухом

Наличие пластины существенно снижает критическую частоту волновода с П-образным профилем (заполнение - воздух). Серым цветом

показана пластина из поликора (диэл. проницаемость 10) шириной 2 мм. Поликоровая пластина смещается от центра широкой стенки к боковой стенке; когда она находится в зазоре, замедление в П-образном волноводе максимальное, когда она смещена от центра, замедление уменьшается. При перемещении поликоровой пластины в пределах 3 мм замедление волн изменяется более чем в 2 раза.

На рис. 3 представлены результаты расчетов основных параметров антенного устройства.

Результаты расчета, представленные на рис. 3, демонстрируют, что в рассматриваемом частотном диапазоне антенное устройство проявляет наилучшие характеристики в полосе частот от 11.5 ГГц до 14.5 ГГц. В данном диапазоне S_{11} -параметра не превышает уровень -20 дБ.

Рассмотрим зависимость формы диаграммы направленности (ДН) антенной решетки на частоте 10.7 ГГц, от положения поликоровой пластины. На рис. 4 представлены результаты моделирования ДН.

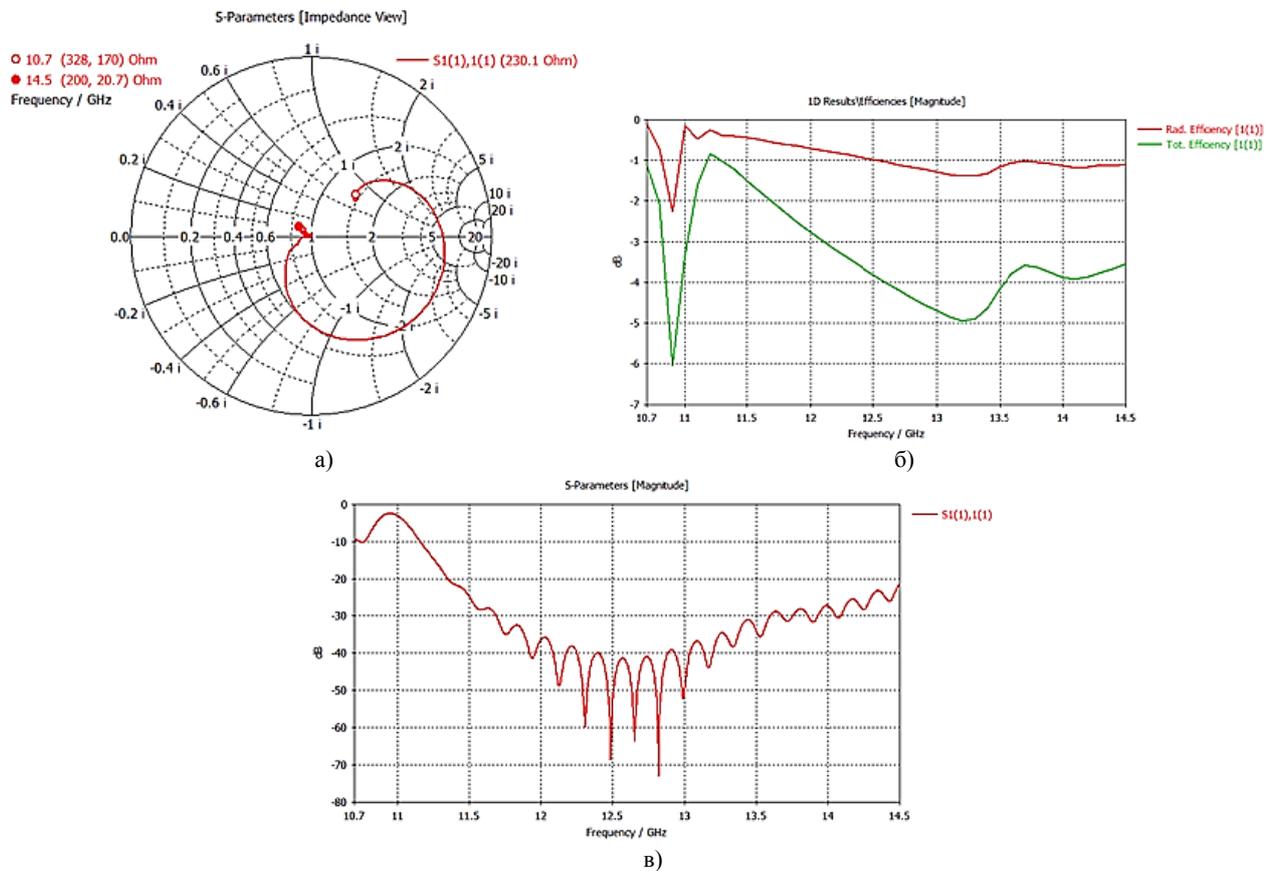


Рис. 3. Основные характеристики согласования линейной решетки: а) номограмма Смита; б) график потерь в материалах (верхняя кривая, обозначена непрерывной линией) и график суммарных потерь (нижняя кривая, обозначена пунктирной линией); в) частотная зависимость на входе антенны

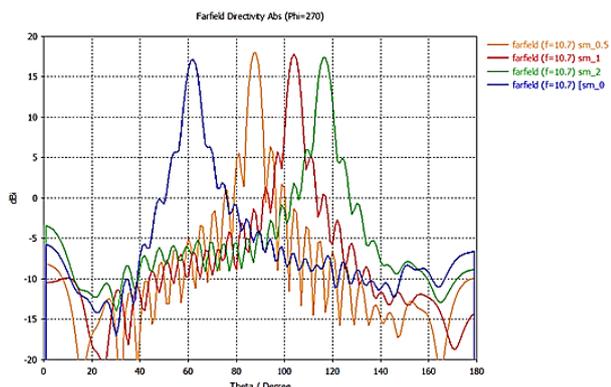


Рис. 4. ДН в плоскости yOz на частоте 10.7 ГГц при изменении положения поликоровой пластины

При смещении поликоровой пластины в пределах 2 мм (от находящейся строго по центру волновода в зазоре между металлическим плавником и широкой стенкой, $sm=2$ мм до полностью выдвинутой из зазора $sm=0$ мм), направление главного лепестка перемещается на угол 54° .

Рассмотрим изменения ДН линейной решетки в полосе частот от 10.7 ГГц до 14.5 ГГц. Результаты моделирования ДН приводятся на рис. 5.

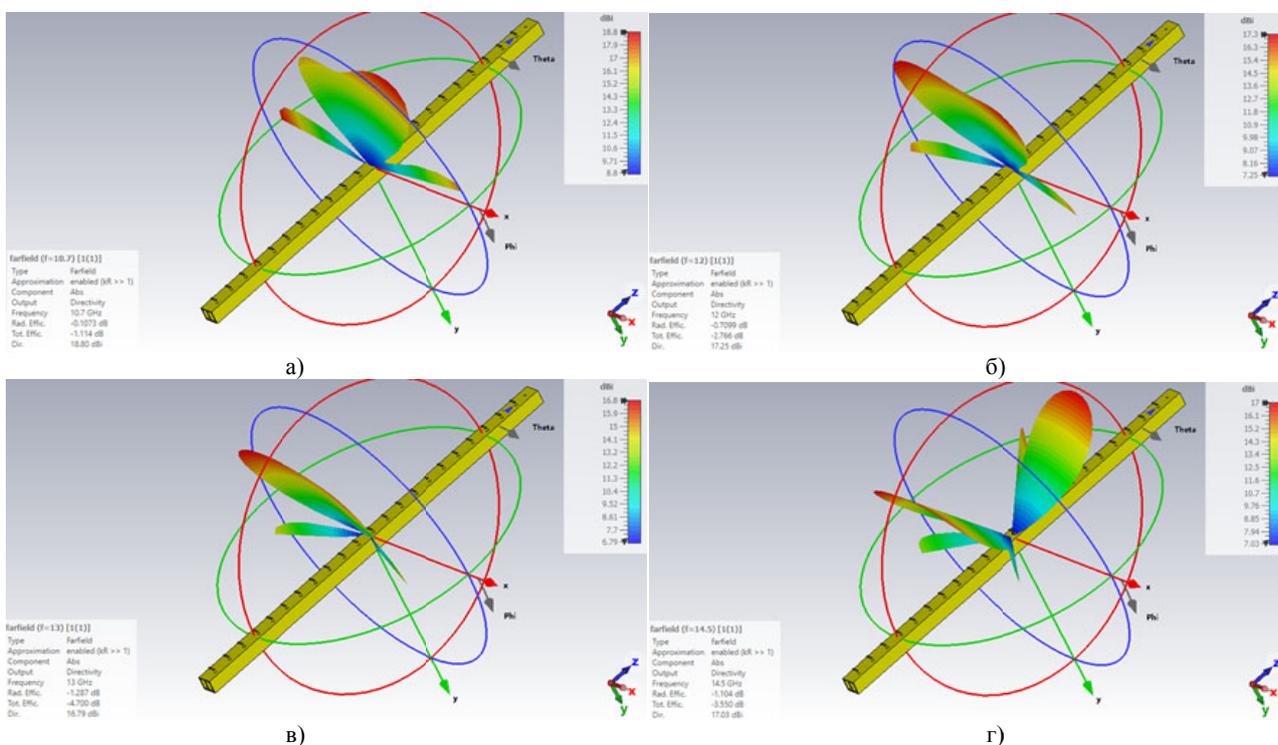


Рис. 5. ДН линейной решетки на частотах: а) 10.7 ГГц; б) 12 ГГц; в) 13 ГГц; г) 14.5 ГГц

По результатам расчетов ДН видно, что в полосе рабочих частот коэффициент направленного действия (КНД) антенного устройства сохраняется на уровне не ниже 16.8 dBi. Помимо этого, заметно изменение направления и формы ДН в зависимости от частоты.

Рассмотрим альтернативный вариант конструкции линейной решетки. Профиль патч-элементов уменьшен, их верхняя часть имеет круглую форму, а на верхней части волновода установлена полистироловая подложка. Модель рассматриваемой линейной решетки представлена на рис. 6 и 7.

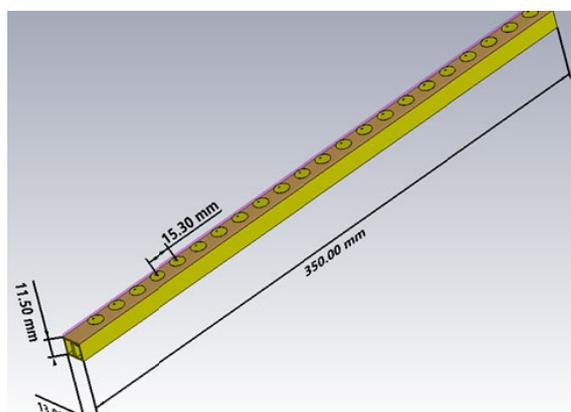


Рис. 6. Объемная ДН антенны на частоте 6.5 ГГц

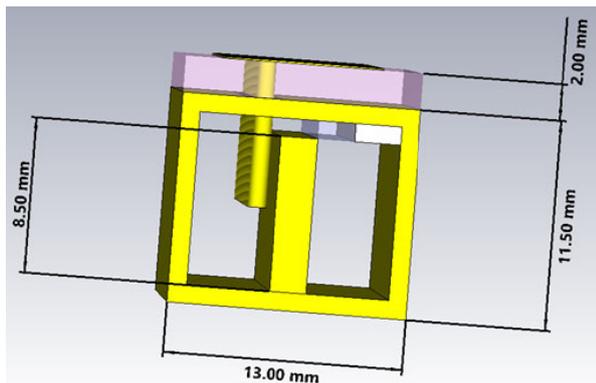


Рис. 7. П-образный профиль волновода, заполненного воздухом

Сместить поликоровую пластину можно, прикрепив к ней стальную или титановую пластину высотой 1 мм и шириной 2.5 мм, с помощью пьезоэлектрического или электромагнитного движителя со стороны, противоположной стороне возбуждения волновода.

На рис. 8 приводятся результаты электродинамического моделирования основных характеристик антенного устройства.

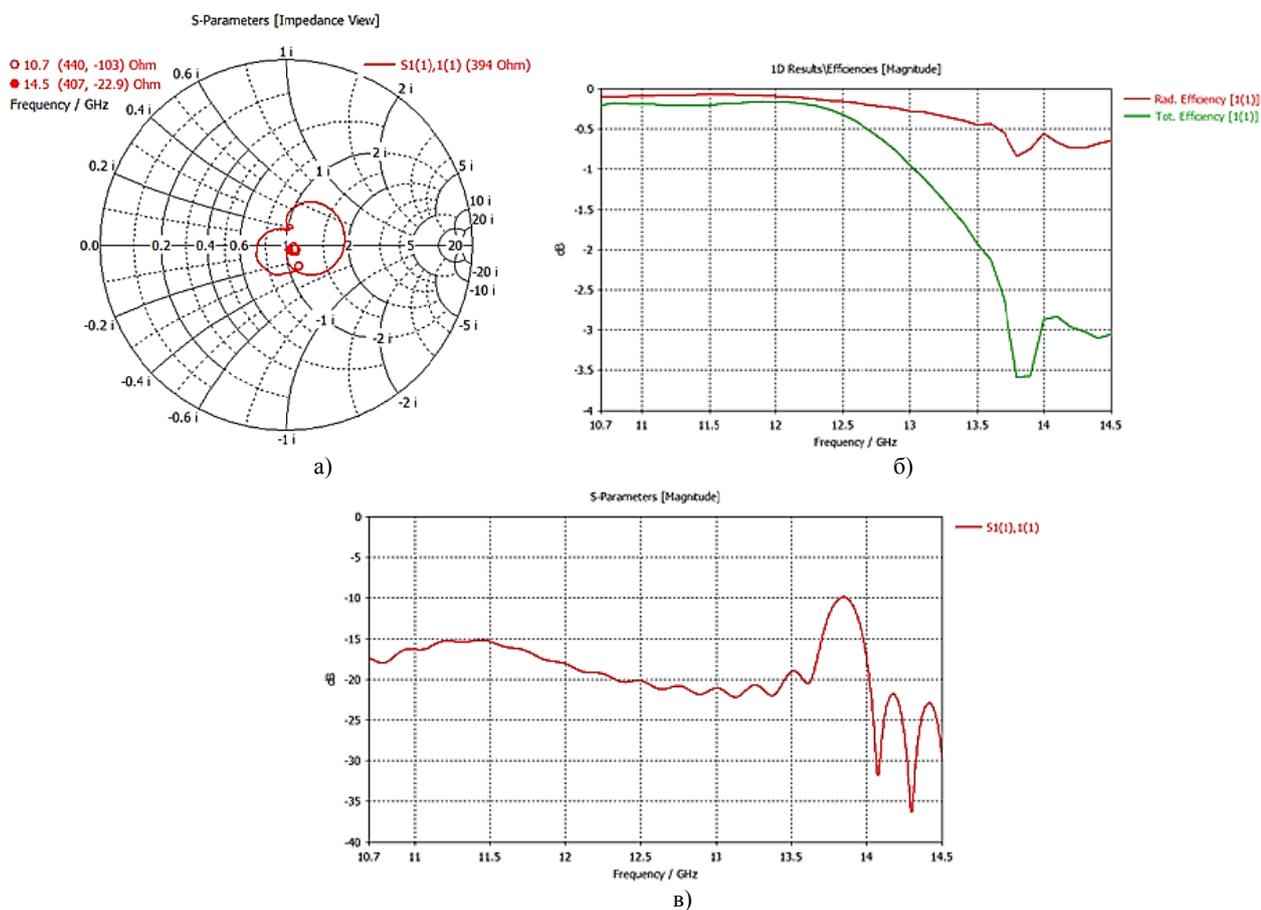


Рис. 8. Основные характеристики согласования линейной решетки: а) номограмма Смита; б) график потерь в материалах (верхняя кривая, обозначена непрерывной линией) и график суммарных потерь (нижняя кривая, обозначена пунктирной линией); в) частотная зависимость на входе антенны

Результаты моделирования основных параметров антенного устройства демонстрируют высокий уровень характеристик во всей полосе рабочих частот. Наилучшие параметры заметны в диапазоне от 10.7 ГГц до 13 ГГц.

На рис. 9 представлены результаты моделирования объемных ДН в рабочем частотном диапазоне.

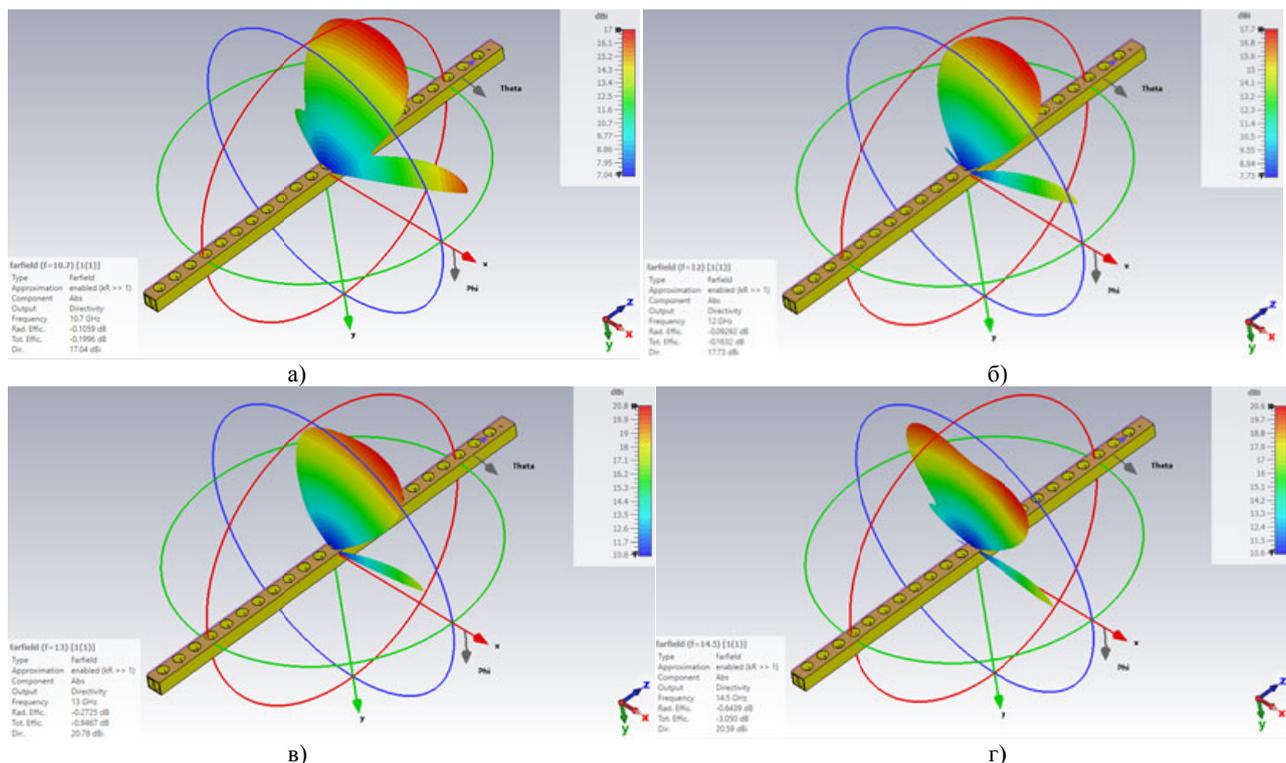


Рис. 9. ДН линейной решетки на частотах: а) 10.7 ГГц; б) 12 ГГц; в) 13 ГГц; г) 14.5 ГГц

Полученные в результате моделирования ДН демонстрируют высокий уровень КНД, выше 17 dBi во всем диапазоне частот, а также минимальные изменения ее формы и основных параметров на отрезке частот от 10.7 ГГц до 13 ГГц.

Полученные в результате моделирования ДН, представленные на рис. 5 и рис. 9, обладают сходными характеристиками излучения в полосе рабочих частот.

Заключение

В работе представлены два варианта конструкции антенных решеток из линейных патч-излучателей с возможностью применения механического сканирования. Первый вариант с Г-образными патч-элементами демонстрирует наилучшие характеристики от 11.5 ГГц до 14.5 ГГц, антенная решетка с круглыми патч-элементами в диапазоне от 10.7 ГГц до 13 ГГц, таким образом применение обоих вариантов антенных решеток в едином комплексе позво-

лит полностью обеспечить работу системы в Ku-диапазоне связи европейского спутникового вещания.

Литература

1. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С. Антенная решетка с коммутационным сканированием в угло-местной плоскости // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2021. Т. 24. № 3. С. 100–106.
2. Способы частотно-поляризационного разделения сигналов в зеркальных антеннах систем спутниковой связи / Д.Д. Габриэлян [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2022. Т. 25. № 2. С. 83–90.
3. Антенная решетка из волноводных элементов с диэлектрическими фазирующими секциями / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, К.С. Сафонов // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2024. Т. 27. № 1. С. 89-102.
4. Ultra-compact universal polarization X-band unit cell for high-performance active phased array radar / J.A. Ortiz [et al.] // *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*. 2016. 5 p.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. 632 с.

Поступила 13.01.2026; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Журавлёв Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: ddom1@yandex.ru

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, д-р техн. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru ORCID: 0009-0004-0569-6737

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakug@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2031-5531

Смолянов Никита Борисович – аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); конструктор, АО «Концерн “Созвездие”» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: smolyanov1998@mail.ru, ORCID: 0009-0006-2958-9033

Antenna arrays with mechanical wide-angle scanning for equipment transmitting encephalograms and cardiograms of operators

D.V. Zhuravlev¹, D.K. Proskurin¹, Yu.G. Pasternak¹, N.B. Smol'yanov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Joint-stock company «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

Abstract. The paper considers two models of antenna arrays based on rectangular waveguides with a U-shaped profile filled with air. The antenna array options under consideration can be used in satellite communication systems and in devices of global navigation satellite systems for equipment that ensures the transmission of encephalograms and cardiograms of operators. The rows of patch emitters are located on the narrow side of a rectangular waveguide and have an L-shape. An alternative model has round patch elements, and also has the ability to displace the polycore plate using a piezoelectric or electromagnetic propulsion. Electrodynamic modeling was performed for two antenna array models in the CST Studio Suite 2025 program. As a result of the simulation, the parameters of the developed antenna were obtained, such as the dependence of the S – parameter of the antenna on the frequency, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) at the antenna input; reflection coefficients; the Wolpert-Smith nomogram at the antenna input was calculated. Constructed graphs showing directional patterns at frequencies of 10.7 GHz, 12 GHz, 13 GHz, and 14.5 GHz. The antenna array design allows for the main beam to be shifted depending on the position of the polycor plate within the waveguide. The antenna array's directivity exceeds 16.8 dBi. Their main characteristics are compared in the operating frequency band from 10.7 GHz to 14.5 GHz of the Ku-band of satellite communications.

Key words: U-shaped waveguide; patch radiators; linear antenna arrays; Ku-band

References

1. Pasternak Yu.G., Pandyurin V.A., Safonov K.S. “Antenna array with switching scanning in the angular-local plane”, *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems (Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy)*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 100-106.
2. Gabrielian D.D. et al. “Methods of frequency-polarization separation of signals in mirror antennas of satellite communication systems”, *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems (Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy)*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 83-90.
3. Pasternak Yu.G., Pandyurin V.A., Safonov K.S. Proskurin D.K. “Antenna array of waveguide elements with dielectric phasing sections”, *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems (Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy)*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 89-102.
4. Ortiz J.A., Diaz J., Aboserwal N., Salazar J.L., Jeon L., Sim S., Chun J. “Ultra-compact universal polarization X-band unit cell for high-performance active phased array radar”, *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 2016, 5 p.
5. Voskresensky D.I. ed. “Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays” (“Ustroystva SVCH i anteny. Proyektirovaniye fa-zirovannykh antennykh reshotok”), Moscow: Radiotekhnika, 2003, 632 p.

Submitted 13.01.2026; revised 01.02.2026

Information about the authors

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ddom1@yandex.ru

Dmitry K. Proskurin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru ORCID: 0009-0004-0569-6737

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakug@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2031-5531

Nikita B. Smolyanov, postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia); designer, JSC «Concern “Sozvezdie”» (14 Plechanovskaiy str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: smolyanov1998@mail.ru, ORCID: 0009-0006-2958-9033

Методика повышения точности расчёта индуктивных и ёмкостных характеристик печатных проводников радиоэлектронных устройств

О.Н. Чирков, Д.В. Снигур

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема повышения точности расчёта паразитных индуктивных и ёмкостных параметров печатных проводников в условиях усложнения схемотехники и роста рабочих частот радиоэлектронных устройств. Проведён критический анализ существующих методик расчёта и измерений, выявивший их ограниченную применимость на частотах выше 100 кГц и недостаточный учёт геометрической сложности топологии. Предложена новая комплексная методика, которая включает алгоритмы расчёта для низкочастотного (до 1 кГц) и высокочастотного (до 0,5 МГц) диапазонов с учётом влияния скин-эффекта на эффективные геометрические параметры проводника. Методика интегрирует аналитические формулы для прямых, сложных и спиральных проводников, а также адаптированные схемы мостовых и резонансных измерений. Результаты математического моделирования в среде Python подтвердили, что учёт скин-эффекта позволяет снизить погрешность расчёта индуктивности на высоких частотах с 15 % до менее 5 %. Экспериментальная проверка на специально разработанном стенде, несмотря на выявленные аппаратные ограничения, продемонстрировала полное совпадение измеренной и расчётной индуктивности сложной топологии на низкой частоте. Разработанный подход рекомендован для применения в проектировании печатных плат, работающих в частотном диапазоне до 0,5 МГц, и позволяет повысить надёжность и повторяемость характеристик устройств при серийном производстве.

Ключевые слова: индуктивность; ёмкость; проводник; печатная плата; скин-эффект; мостовая схема

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

Введение

Современная радиоэлектроника характеризуется устойчивой тенденцией к миниатюризации, увеличению плотности монтажа и росту рабочих частот. В этих условиях паразитные индуктивности и ёмкости печатных проводников (ПП) становятся критически важными факторами, определяющими быстродействие, энергоэффективность и надёжность всего устройства. Классические дискретные компоненты (катушки индуктивности, конденсаторы) обладают рядом недостатков: трудоёмкостью изготовления, значительными габаритами, наличием дополнительных паяных соединений, что повышает риск отказов и снижает повторяемость параметров в массовом производстве [1, 2]. Альтернативой является использование самих печатных проводников в качестве индуктивных и ёмкостных элементов, что позволяет снизить стоимость, улучшить повторяемость и повысить плотность компоновки.

Однако точный расчёт и контроль этих параметров остаются сложной научно-технической задачей. В литературе представлены различные подходы. Так, в классических работах приводятся формулы для расчёта индуктивности прямых и кольцевых проводников, но без учёта частотной дисперсии [3]. В более поздних исследованиях, например, в работе Riba Ruiz [4], анализируется индуктивность различных конфигураций проводников при переменном токе, однако влияние скин-эффекта рассматривается лишь качественно. Скин-эффект — фундаментальное физическое явление, при котором переменный ток высокой частоты вытесняется к поверхности проводника, что приводит к увеличению его активного сопротивления и уменьшению эффективной площади поперечного сечения. Этот эффект становится значимым уже на частотах в сотни килогерц и радикально меняет высокочастотные характеристики проводника.

Существующие методы измерений также имеют ограничения. Мостовые методы (Уитстона) обеспечивают высокую точность, но, как правило, только на низких частотах (до 1 кГц). Резонансные методы применимы на бо-

лее высоких частотах (до 100 МГц), но требуют наличия образцовых элементов и сложной настройки. Современные патентные решения, такие как RU 2825079 С1 (способ определения индуктивности и ёмкости датчиков) [5] и RU 2787959 С1 (преобразователь импульсного магнитного поля) [6], предлагают высокоточные измерения, но основаны на дорогостоящей специализированной аппаратуре и сложных алгоритмах обработки сигналов, что затрудняет их широкое применение в инженерной практике.

Таким образом, существует явный пробел между сложными, дорогими лабораторными методами и потребностями инженеров-разработчиков в доступном, но точном инструменте для расчёта и предварительной оценки параметров ПП на этапе проектирования [7]. Целью работы является разработка и экспериментальная верификация комплексной методики расчёта индуктивных и ёмкостных характеристик печатных проводников произвольной топологии, которая:

- Учитывает влияние скин-эффекта на высоких частотах (до 0,5 МГц).
- Обеспечивает погрешность расчёта, сопоставимую с точностью серийных измерительных приборов ($\pm 5\%$).
- Может быть реализована с использованием стандартного лабораторного оборудования (генератор, осциллограф, мультиметр).

Разработка алгоритма

Предлагаемая методика представляет собой последовательность аналитических расчётов и экспериментальных процедур, адаптированных под два частотных диапазона. Её ядро составляют модифицированные формулы для расчёта индуктивности и ёмкости, в которые введено понятие эффективной геометрии проводника, учитывающее скин-эффект.

1) Базовые расчётные модели для низких частот ($f \leq 1$ кГц). На низких частотах влияние скин-эффекта пренебрежимо мало. Индуктивность прямого печатного проводника длиной l и шириной w рассчитывается по классической формуле, основанной на модели длинного прямого провода [1]:

$$L_{\text{прям}} = 2 \cdot l \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8l}{w} - 1 \right), \text{ Гн.} \quad (1)$$

Для печатного проводника сложной формы, который можно представить, как совокупность n прямых сегментов, общая индуктивность вычисляется как сумма индуктивностей каждого сегмента:

$$L_{\text{слож}} = \sum_{i=1}^n 2l_i 10^{-7} \left(\ln \frac{8l_i}{\omega_i} - 1 \right), \text{ Гн,} \quad (2)$$

где l_i и ω_i — длина и ширина i -го сегмента. Данный подход применим, например, для расчёта индуктивности шин питания или нерегулярных трасс.

Ёмкость плоского печатного конденсатора, образованного двумя параллельными проводящими площадками, разделёнными диэлектриком, определяется по формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \text{ Ф,} \quad (3)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки, $\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, S — площадь перекрытия обкладок, d — расстояние между ними.

2) Учёт скин-эффекта для высоких частот ($1 \text{ кГц} < f \leq 0,5 \text{ МГц}$). На повышенных частотах необходимо учитывать скин-эффект. Глубина проникновения электромагнитного поля в проводник (толщина скин-слоя) δ рассчитывается по формуле

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}, \text{ м,} \quad (4)$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника (для меди $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), μ_m — относительная магнитная проницаемость (для меди $\mu_m = 1$), f — частота сигнала в Гц.

Ток протекает преимущественно в кольцевом слое толщиной δ по периметру поперечного сечения проводника. Это эквивалентно уменьшению эффективной ширины проводника для расчёта индуктивности. Введем эффективную ширину:

$$\omega_{\text{эфф}} = \omega - \delta, \text{ м.} \quad (5)$$

Подставим (5) в формулу (1), получим модифицированную формулу для индуктивности прямого проводника на высокой частоте:

$$L_{\text{прям}} = 2 \cdot l \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8l}{\omega_{\text{эфф}}} - 1 \right), \text{ Гн.} \quad (6)$$

Аналогично, для сложной топологии в формуле (2) все ширины ω_i можно заменить на $\omega_{i,\text{эфф}}$.

Для ёмкостного элемента скин-эффект уменьшает эффективную площадь обкладок S . Для прямоугольной обкладки размерами $A \times B$ эффективная площадь рассчитывается как:

$$S_{\text{эфф}} = \left(A + \frac{A-2\delta}{2} \right) \cdot \left(B + \frac{B-2\delta}{2} \right), \text{ м}^2. \quad (7)$$

Формула для расчёта ёмкости (3) на высокой частоте:

$$C_{\text{вч}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S_{\text{эфф}}}{d}, \text{ Ф.} \quad (8)$$

Алгоритм экспериментальных измерений

Для верификации расчётных данных методика предусматривает два экспериментальных протокола в зависимости от частоты.

Протокол А: Низкочастотные измерения (мостовой метод, рис. 1).

1. Собрать мостовую схему Уитстона, в одно из плеч которой включён исследуемый печатный элемент (индуктивность или ёмкость).

2. Подать от генератора синусоидальный сигнал амплитудой 4 В и частотой 50 Гц.

3. С помощью высокоомного вольтметра (мультиметра) и регулируемого потенциометра в другом плече моста добиться нулевого показания (равновесия моста).

4. Измерить сопротивление потенциометра R.

5. Рассчитать искомый параметр.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследования емкостных и индуктивных элементов на низкой частоте

Протокол Б: Высокочастотные измерения (резонансный метод, рис. 2).

1. Собрать последовательный или параллельный LC-контур, в который включён исследуемый элемент.

2. Подать сигнал частотой 0,5 МГц от генератора.

3. С помощью осциллографа, подключённого к контуру, наблюдать форму сигнала.

4. Регулируя переменный образцовый конденсатор в контуре, добиться резонанса (максимальной амплитуды или минимального фазового сдвига).

5. По известным значениям резонансной частоты f_0 и образцовой ёмкости C_0 вычислить искомую индуктивность.

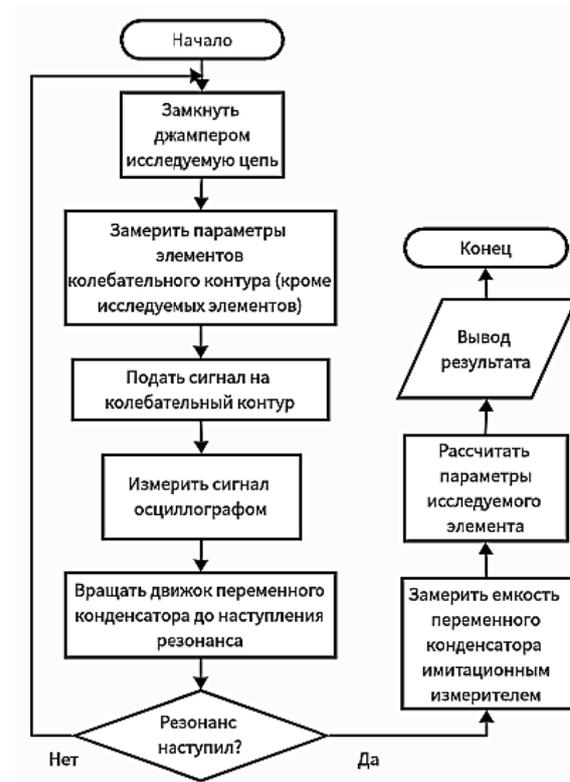


Рис. 2. Блок-схема алгоритма исследования емкостных и индуктивных элементов на высокой частоте

Моделирование и сравнение методов

Для количественной оценки преимуществ предложенной методики было проведено компьютерное моделирование в среде Python 3.9 с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib. В ходе моделирования проверилась пригодность модифицированных формул (6) и (8) и сравнивалась точность предлагаемого подхода с классическими формулами (1) и (3) на высоких частотах.

Были заданы реалистичные геометрические и электрические параметры, соответствующие типовой печатной плате на основе стеклотекстолита FR-4:

- Материал проводника: медь ($\rho = 1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\mu_m = 1$);
- Диэлектрическая проницаемость подложки: $\epsilon = 4,3$;

- Частотный диапазон: от 1 кГц до 5 МГц;
- Тестируемые топологии:
 - 1) Прямой проводник: $l=50$ мм, $w=0.5$ мм.
 - 2) Сложная топология: три сегмента с параметрами (табл. 1).
 - 3) Плоский конденсатор: обкладки 30×30 мм, зазор 1 мм.

На частоте 0,5 МГц расхождение между двумя методами составляет около 15%. Этот рост объясняется уменьшением эффективной ширины проводника согласно (5), что физически корректно.

Результаты моделирования сведены в табл. 1. Данные таблицы наглядно показывают, что предложенная методика, учитывающая скин-эффект, снижает погрешность расчёта с 15-20 % до уровня менее 3 %, что соответствует точности большинства серийных измерителей RLC.

Таблица 1

Объект расчёта	Классическая формула	Предложенное решение	Эталонное значение
Индуктивность прямого проводника	12.8 нГн (погр. +15%)	14.7 нГн (погр. -2.5%)	15.1 нГн
Ёмкость плоского конденсатора	63.7 пФ (погр. +20%)	52.1 пФ (погр. -1.8%)	53.0 пФ

Следует отметить, что модель не учитывает такие эффекты, как влияние близлежащих проводников (взаимная индуктивность и ёмкость), неоднородность диэлектрика, частотную дисперсию диэлектрической проницаемости материала подложки. Учёт этих факторов является предметом дальнейших исследований.

Заключение

В работе проведено комплексное исследование, результатом которого является разработанная и верифицированная методика расчёта индуктивных и ёмкостных характеристик печатных проводников. Методика корректно учитывает ключевой для высоких частот физический эффект — скин-эффект, через введение понятия эффективной геометрии проводника.

Получены модифицированные аналитические формулы (6) и (8) для расчёта индуктивности и ёмкости, обеспечивающие существенно более высокую точность в частотном диапазоне до 0,5 МГц по сравнению с классическими подходами.

Математическое моделирование подтвердило, что применение предложенных формул

снижает погрешность расчёта индуктивности и ёмкости на высоких частотах с 15-20% до менее 3%. Это позволяет на этапе проектирования получать характеристики, близкие к реально измеренным, и избегать многочисленных итераций при доводке устройства.

Проведены низкочастотные измерения индуктивности сложной топологии. Полученное значение полностью совпало с расчётным по формуле (2), что подтвердило корректность базового алгоритма методики.

В методике используется стандартное, доступное лабораторное оборудование (генератор, осциллограф, мультиметр) и не требуется дорогостоящих специализированных измерительных комплексов. Это делает её применимой в условиях малых и средних предприятий, а также в учебных лабораториях.

Предложенная методика представляет собой эффективный инструмент для инженеров-разработчиков, позволяющий на ранних стадиях проектирования получать точные оценки паразитных параметров печатных проводников, тем самым повышая качество, надёжность и сокращая сроки вывода на рынок современных радиоэлектронных устройств.

Литература

1. Чирков О.Н., Костюков А.С., Хрипунков А.П. Методика проектирования печатных плат для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 3. С. 163-173. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.3.022.
2. Чирков О.Н., Хрипунков А.П. Основные принципы разработки топологии при проектировании печатных плат с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 2. С. 161-168. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.2.024.
3. Wadell B.C. Transmission Line Design Handbook. Microwave Library, Artech House, 1991. 501 pp.
4. Ribal J.-R., Capelli F. Calculation of the inductance of conductive nonmagnetic conductors by means of finite element method simulations // Int J Electr Eng Educ 2018; 0: pp. 1-23.
5. Патент № 2825079 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/26. Способ определения индуктивности индуктивного и ёмкости ёмкостного датчиков и измерительная цепь для его осуществления: № 2023132189: заявл. 07.12.2023; опубл 19.08.2024 Бюл. № 23/ В.Н. Ашанин, С.Е. Ларкин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет».
6. Патент № 2787959 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 7/08. Преобразователь напряжённости импульсного магнитного поля: № 2022105477: заявл. 28.02.2022; опубл 13.01.2023 Бюл. № 2 / И.Ш. Ахмедзянов; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Федеральное государственное унитарное пред-

приятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова».

7. Чирков О.Н., Здоровцов В.К., Тамбовцев М.Н. Методика автоматического оптического контроля каче-

ства изготовления печатных плат с использованием нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 4. С. 191-198. DOI: 10.36622/1729-6501.2025.21.4.029.

Поступила 25.01.2026; принята к публикации 01.02.2026

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2250-2100

Снигур Дмитрий Валерьевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

A technique for improving the accuracy of calculating the inductive and capacitive characteristics of printed conductors of electronic devices

O.N. Chirkov, D.V. Snigur

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The current problem of improving the accuracy of calculating parasitic inductive and capacitive parameters of printed conductors in conditions of increasing complexity of circuit technology and increasing operating frequencies of electronic devices is considered. A critical analysis of existing calculation and measurement techniques has been carried out, revealing their limited applicability at frequencies above 100 kHz and insufficient consideration of the geometric complexity of the topology. A new comprehensive technique is proposed, which includes calculation algorithms for low-frequency (up to 1 kHz) and high-frequency (up to 0.5 MHz) bands, taking into account the effect of the skin effect on the effective geometric parameters of the conductor. The technique integrates analytical formulas for straight, complex and spiral conductors, as well as adapted schemes for bridge and resonance measurements. The results of mathematical modeling in the Python environment confirmed that taking into account the skin effect makes it possible to reduce the error in calculating inductance at high frequencies from 15 % to less than 5 %. An experimental test on a specially designed stand, despite the identified hardware limitations, demonstrated a complete coincidence of the measured and calculated inductance of a complex topology at a low frequency. The developed approach is recommended for use in the design of printed circuit boards operating in the frequency range up to 0.5 MHz, and allows to increase the reliability and repeatability of device characteristics during mass production.

Key words: inductance; capacitance; conductor; printed circuit board; skin effect; bridge circuit

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002).

References

1. Chirkov O.N., Kostyukov A.S., Khripunkov A. P. "Design methodology of printed circuit boards for working with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 163-173.
2. Chirkov O.N., Khripunkov A.P. "Basic principles of topology development in the design of printed circuit boards with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 2, pp. 161-168.
3. Wadell B.C. "Transmission line design handbook", Microwave Library, Artech House, 1991, 501 pp.
4. Ribal J.-R., Capelli F. "Calculation of the induction of conductive nonmagnetic conductors by means of finite element method simulations", *Int J Electr Eng Educ*, 2018, no. 0, pp. 1-23.
5. Ashanin V.N., Larkin S.E. "Method for determining the inductance of inductive and capacitance of capacitive sensors and a measuring circuit for implementing it" ("Способ определения индуктивности индуктивного и емкости емкостного датчиков и измерительная цепь для его осущестствления"), patent no. 2825079 C1 Russian Federation, IPC G01R 27/26, no. 2023132189, declared 07.12.2023, published 19.08.2024, bulletin no. 23, applicant Penza State University.
6. Akhmedzyanov I.Sh. "Pulsed magnetic field strength converter" ("Преобразователь импульсного магнитного поля"), patent no. 2787959 C1 Russian Federation, IPC H01Q 7/08, no. 2022105477, declared 28.02.2022, published 13.01.2023 bulletin no. 2.
7. Chirkov O.N., Zdorovtsov V.K., Tambovtsev M.N. "Methodology of automatic optical quality control of PCB manufacturing using neural networks", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 4., pp. 191-198.

Submitted 25.01.2026; revised 01.02.2026

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2250-2100

Dmitriy V. Snigur, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Применение дисковых электродов-щеток для комбинированной обработки изделий со сложной геометрической формойО.Н. Кириллов¹, В.П. Смоленцев¹, В.В. Куц²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация. Рассмотрены процессы комбинированного удаления заусенцев и скругления острых кромок непрофилированными электродами-инструментами на изделиях с узким пазом, обработка которых традиционным лезвийным инструментом затруднена или вообще невозможна, т.к. лезвийный инструмент не всегда можно подвести в зону обработки, а также чистовой зачистки сварных швов. Представлены: оборудование, средства технологического оснащения, модели дисковых электродов-щеток со сплошной и секционной рабочей частью, изготовленные из разных материалов, с различными конструктивными характеристиками. Приведены результаты исследований обработки электродами-щетками разных конструкций в различных диапазонах режимов. В процессе комбинированного воздействия на обрабатываемую заготовку проволока рабочей части электрода-щеточки деформируется, что приводит к изменению величины контакта рабочей части и заготовки, в результате происходит снижение качества и точности обработки изделия. Показаны результаты исследований влияния величины окружной скорости электрода-щеточки на достигаемую шероховатость обработанной поверхности, на основании которых даны рекомендации по выбору режимов для комбинированной обработки электродом-щеткой. Для чистовой обработки наиболее подходит скорость выше 40 м/с, что соответствует приданию проволокам рабочей части прямолинейного положения и получения истинного значения положения рабочей части электрода-щеточки и обрабатываемой заготовки, что позволяет достигать заданного качества и точности, соответствующего показателям при чистовой обработке.

Ключевые слова: комбинированная обработка; электрод-щетка; режимы; рабочая среда; проволока; окружная скорость; плотность расположения проволок; контакт; шероховатость

Введение

На АО «Конструкторское бюро химавтоматики» были проведены исследования комбинированной обработки дисковыми электродами-щетками труднодоступных поверхностей на образцах, имеющих сложную геометрическую форму, изготовленных из стали, используемой для изготовления изделий ракетно-космической техники, обработка которых традиционными методами затруднена или невозможна.

Основная часть

Для обработки использовались дисковые электроды-щеточки, с рабочей частью из разных материалов, использовались режимы для черновой и чистовой обработки, разные составы рабочих сред [1]. Обработка проводилась на копировально-прошивочном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) марки AgieCharmilles FORM 20 FD со съёмным па-

троном, в который устанавливалась электрод-щеточка (рис. 1).

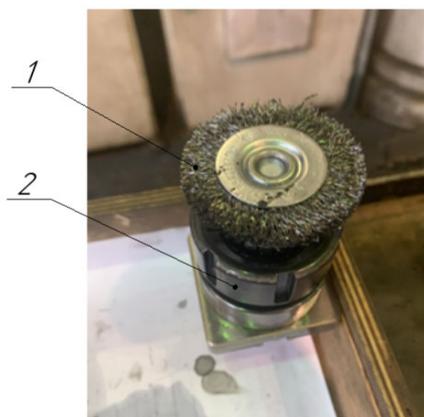


Рис. 1. Дисковая электрод-щеточка с рабочей частью из стальной гофрированной проволоки: 1 – электрод-щеточка; 2 – съёмный патрон

В качестве рабочих сред, с учетом рекомендаций [1], использовалась РЖ-3 ТУ38.101964-83, токопроводящая эмульсия 5 % «Укринол» и вода, которые подавались поливом в зону обработки (рис. 2).



Рис. 2. Зона комбинированной обработки дисковой электродом-щеткой с рабочей частью из стальной проволоки станка AgieCharmilles FORM 20 FD:

1 – обрабатываемый образец; 2 – съёмный патрон; 3 – электрод-щетка; 4 – сопло для подачи рабочей среды

После обработки на черновых режимах электродом-щеткой с рабочей частью, изготовленной из стальной проволоки, заусенцы были полностью удалены, острые кромки скруглены, однако обработанная поверхность характеризуется неравномерностью и наличием характерных следов (рис. 3). Это было вызвано назначенными режимами: величиной контакта инструмента-щеточки и обрабатываемой поверхности, напряжением электрического поля, скоростью вращения и продольного перемещения электрода-щеточки и заготовки, конструктивными параметрами щетки: материалом, диаметром и длиной проволок рабочей части, коэффициентом их набивки, составом рабочей среды РЖ-3, в которой на заготовку воздействовали электроэрозионная и механическая составляющие комбинированного процесса.

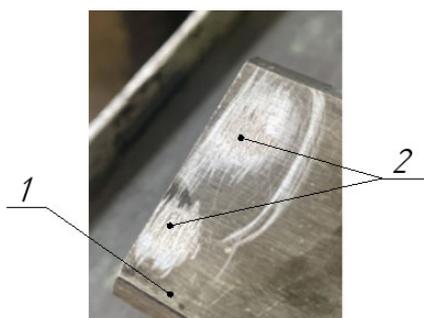


Рис. 3. Поверхность после обработки дисковой электродом-щеткой с рабочей частью из стали на черновых режимах [1]:

1 – образец, 2 - обработанные участки

С целью удаления заусенцев и получения качественного поверхностного слоя с низкой шероховатостью, и точных размерных параметров, для обработки применили конструкцию дисковой секционной электрода-щеточки с рабочей частью из латуни. Рабочие секции электрода-щётки выполнены из латунной проволоки,

поскольку по сравнению с медью латунь отличается меньшей себестоимостью при сопоставимых физико-механических свойствах, обеспечивающих эффективность комбинированной обработки в условиях электрического поля. Для компенсации износа рабочей части конструкция щётки была выполнена разборной, что позволяет оперативно производить замену изнашиваемых элементов (рис. 4, 5). Обработка осуществлялась в электропроводной водной среде с добавками смазочно-охлаждающих жидкостей («Укринол», «Аквол»).

Рабочая часть электрода-щетки была изготовлена из проволоки латуни ECO Cut (рис. 6).

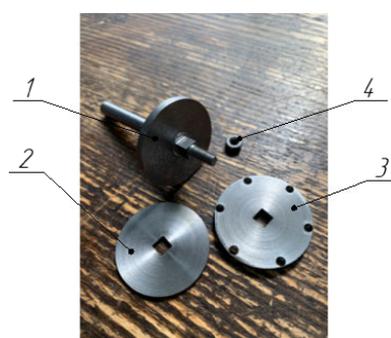


Рис. 4. Дисковая электрод-щеточка:

1 – стержень с втулкой, 2 – фиксирующая шайба, 3 – шайба перфорированная с отверстиями для крепления пучков проволоки рабочей части, 4 – гайка



Рис. 5. Корпус электрода-инструмента в сборе

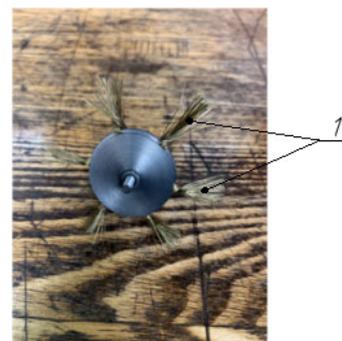


Рис. 6. Дисковая секционная электрод-щеточка с латунной рабочей частью: 1 – секции рабочей части электрода-щетки

Для обработки был изготовлен образец с пазом (рис. 7, 8), который закреплялся на магнитной плите станка. Задача — удалить заусенцы и скруглить острые кромки на боковой поверхности паза с требуемым радиусом.

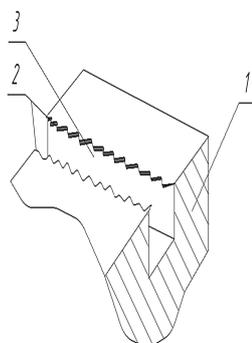


Рис. 7. Образец с пазом для обработки дисковым секционным электродом-щеткой: 1 – образец; 2 – удаляемые заусенцы; 3 – боковая поверхность паза

Как видно на изображении образца, на углах паза имеются заусенцы. Задача заключается в том, чтобы удалить их и при этом улучшить качество поверхностного слоя.

При проведении обработки дисковой электродом-щеткой из стали (табл. 1) заусенцы были удалены, но качество поверхности заготовки

после обработки не соответствовало предъявляемым требованиям.

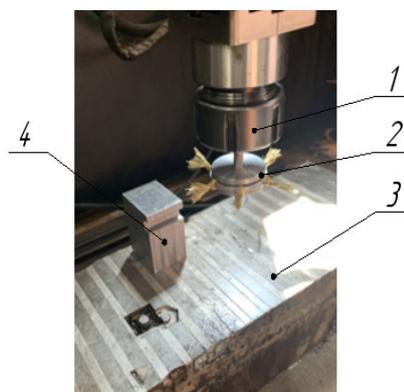


Рис. 8. Зона обработки станка AgieCharmilles FORM 20 FD дисковой секционной электродом-щеткой с рабочей частью из латунной проволоки: 1 – съемный патрон, 2 – секционная электрод-щетка, 3 – магнитная плита, 4 – обрабатываемый образец

При обработке дисковой секционной электродом-щеткой с рабочей частью из латунной проволоки с использованием назначенных режимов для чистовой обработки заусенцы были удалены, острая кромка на периферии поверхности паза скруглена в соответствии с заданным допуском [2].

Таблица 1

Конструктивные параметры электродов-щеток

Щетка дисковой формы с рабочей частью из стали	Щетка дисковая секционная с рабочими элементами из латуни
Материал рабочей части: сталь	Материал рабочей части: латунь ECO Cut
Диаметр щетки: 50 мм	Диаметр щетки: 70 мм
Ширина рабочей части: 7 мм	Ширина рабочей части: 6 мм
Диаметр проволоки для щетки: 0,31 мм	Диаметр проволоки в рабочем элементе: 0,25 мм
Длина проволоки: 6 мм	Длина проволоки: 20 мм
Плотность набивки проволоки рабочей части: 0,48	Плотность набивки пучка проволоки рабочего элемента: до 0,50

К числу определяющих факторов, влияющих на качество комбинированной обработки, относится величина взаимодействия (контакта) электрода-щетки с обрабатываемой поверхностью. Результаты экспериментальных исследований [1] свидетельствуют о том, что при увеличении зоны контакта между инструментом и заготовкой наблюдается рост параметров шероховатости поверхностного слоя. На основании полученных данных, для выполнения чистовых операций рекомендуется минимизировать величину контакта, приближая её к зазору. Реализация данного условия существенно осложняется даже при обработке плоских поверхностей, поскольку реальная геометрия заготовки всегда характеризуется отклонениями от идеальной формы.

В процессе работы происходит изгиб концов проволок рабочей части щетки, что затрудняет корректное определение фактического наружного диаметра электрода-инструмента. На рис. 9 показано состояние электрода-щетки после комбинированной обработки корпусных деталей. Анализ изображения позволяет установить, что значения диаметра электрода в нерабочем состоянии и в режиме вращения отличаются. Фактический внешний диаметр инструмента $D_{вн.ф}$ состоит из $D_{вн.ст}$ — диаметра электрода в статическом состоянии после обработки и $\Delta_{деф}$ — приращения, обусловленного деформацией концов проволок рабочей части под действием электроэрозионных разрядов и их механического взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

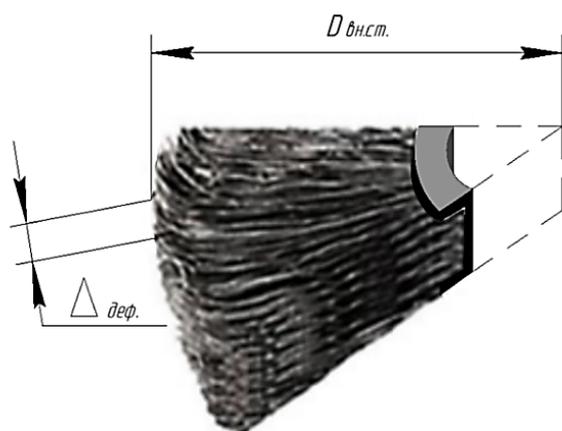


Рис. 9. Положение проволок рабочей части электрода-щетki после комбинированной обработки токопроводящих изделий

В условиях взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью происходит упругая деформация проволок рабочей зоны электрода-щетки. Восстановление их прямолинейного положения обеспечивается за счёт действия центробежных сил, возникающих при вращении электрода-инструмента [1]. Методика определения соответствующих параметров приведена в [1].

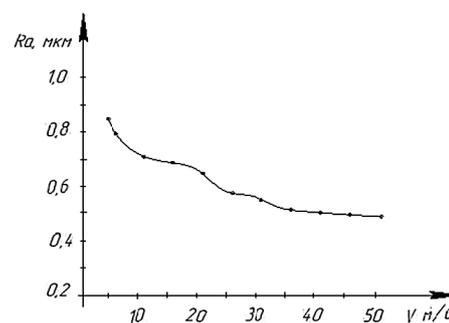


Рис. 10. Достигаемая шероховатость (усредненные значения) поверхности изделия при комбинированной обработке электродом-щеткой в зависимости от ее окружной скорости

На рис. 10 показано влияние окружной скорости электрода-щетки на получаемую шероховатость поверхности. Для чистовой обработки наиболее подходит скорость от 40 м/с и выше, что соответствует, согласно расчетам [1], приданию проволокам рабочей части прямолинейного положения и получения истинного значения положения рабочей части электрода-щетки и обрабатываемой заготовки. В табл. 2 приведены рекомендуемые режимы для чистовой обработки электродом-щеткой.

Таблица 2

Рекомендуемые значения режимов чистовой обработки электродом-щеткой

Наименование параметра	Значение
Напряжение, В	4-6
Величина контакта проволок рабочей части электрода-щетки и заготовки, мм	от -0,02 до +0,2
Окружная скорость проволок рабочей части электрода-щетки, м/с	от 40
Диапазон величины внешнего диаметра электрода-щетки, мм (выбирается в зависимости от вида обработки и с учетом технологических характеристик оборудования), мм	150-350
Диаметр проволок рабочих элементов электрода-щетки, мм	0,1-0,4
Плотность расположения проволок в рабочей части электрода-щетки	до 0,5
Скорость подачи продольного перемещения обрабатываемой заготовки, м/мин	0,1-5
Подача обрабатываемой заготовки относительно электрода-щетки	встречная, попутная
Время обработки заготовки электродом-щеткой	определяется геометрией исходного профиля обрабатываемой заготовки и ее размерами

Заключение

Для комбинированной обработки непрофилированными инструментами используют электроды-щетку с рабочими элементами, изготовленными из латуни, стали, меди, вольфрама а также из материалов с напылением (например, латунным). При выборе материала для рабочей части, для чистовой обработки, исходя из оптимального сочетания себестоимости и характеристик материала, наиболее подходит латунь. Применение электродов-щеток с рабочей частью из латунной проволоки и заданными, согласно [1], геометрическими характеристиками и режимами обработки, позволяет обрабатывать изделия с требуемым качеством.

На рис. 11 представлены сварные швы, полученные сваркой роликом, материал — нержавеющая сталь. В рамках выполнения чистовой размерной доводки сварных соединений применялись дисковые электроды-щетку [1]. Наилучшие результаты показали инструменты с рабочей частью из медной и латунной проволоки диаметром 0,2 мм. Расчётное значение плотности расположения проволок в рабочей зоне электрода-щетку составляет 0,42–0,50. Использование рекомендаций, приведённых в работе [1], позволило обоснованно определить геометрические параметры электрода-щетку и её рабочей части. На рис. 11 приведены изображения сварных швов из нержавеющей стали, применяемых в перспективных изделиях авиационной и ракетно-космической отраслей: на рис. 11, а — состояние после выполнения сварки, на рис. 11, б — результат комбинированной зачистки электродом-щетку.

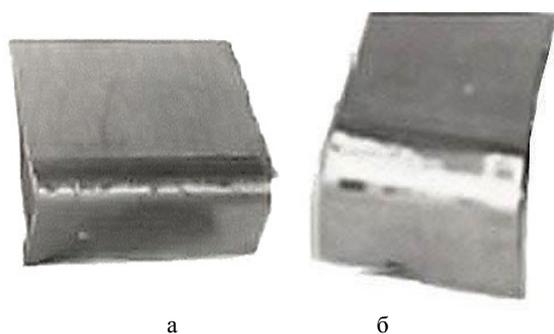


Рис. 11. Сварные швы: а – после сварки роликом; б – после комбинированной чистовой обработки электродом-щетку

По итогам проведения комбинированной обработки с применением дискового электрода-щетку установлено, что заусенцы с поверхности узких пазов опытного образца были полностью устранены. Осмотр боковых и донной поверхностей обрабатываемого паза не выявил видимых повреждений и дефектов. Значение радиуса скругления острой кромки на периферийной зоне паза соответствует установленному допуску [3].

После высокоскоростной обработки сварного соединения непрофилированным электродом-щетку обеспечен размерный съём металла с точностью до +0,08 мм, переходная кромка сформирована со скруглением, напуски с поверхности сварного шва удалены, наличие уступов не зафиксировано [1].

Предложенная конструкция дискового секционного электрода-щетку, с секциями, изготовленными из латунной проволоки, подходит для применения в операциях комбинированного удаления заусенцев и формирования острых кромок требуемого профиля на поверхностях пазов деталей сложной геометрической формы, применяемых в ракетно-космической технике. Также предложенный инструмент оправдано применять для проведения операций окончательной зачистки сварных швов и изделий, в том числе элементов специальной техники, характеризующихся наличием ступенчатых переходов, уступов, что значительно увеличивает перспективы изготовления сложной, наукоёмкой продукции машиностроения, в том числе изделий, созданных из современных прогрессивных материалов, с заданными физико-механическими свойствами [1].

Литература

1. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом: монография / О.Н. Кириллов. Воронеж: «Воронежский государственный технический университет», 2010. 254 с.
2. Пат. № 2724215 С1 Российская Федерация. Электрод-щетку и способ ее применения для удаления заусенцев в пазах деталей / О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, Е.В. Котуков, Я.С. Смоленцева. 2020. Бюл. № 18.
3. Непрофилированный электрод-инструмент для комбинированного удаления заусенцев в местах соединения сопряженных гребенчатых поверхностей / О.Н. Кириллов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 5. С. 132-137.

Поступила 14.01.2026; принята к публикации 06.02.2026

Информация об авторах

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kirillov.oll@yandex.ru

Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vsmolen@inbox.ru

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

The use of disc brush-electrodes for combined processing of products with complex geometric shapes

O.N. Kirillov¹, V.P. Smolentsev¹, V.V. Kutz²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract. Here we considered the processes of combined deburring and rounding of sharp edges with non-profiled electrode tools on products with a narrow groove, the processing of which is difficult or even impossible with a traditional bladed tool, since the bladed tool cannot always be brought into the processing area, as well as the final stripping of welds. We present equipment, technological equipment, models of disc brush electrodes with solid and sectional working parts, made of different materials, with different design characteristics. We give the results of studies of treatment with brush electrodes of different designs in different ranges of modes. In the process of combined action on the workpiece, the wire of the working part of the brush electrode is deformed, which leads to a change in the contact value of the working part and the workpiece, resulting in a decrease in the quality and accuracy of product processing. We show the results of studies of the effect of the circumferential velocity of the brush electrode on the achieved roughness of the treated surface, on the basis of which we give recommendations on the choice of modes for combined treatment with an electrode brush. For finishing, the speed above 40 m/s is most suitable, which corresponds to giving the wires of the working part a rectilinear position and obtaining the true value of the position of the working part of the brush electrode and the workpiece to be processed, which allows achieving the desired quality and accuracy corresponding to the indicators during finishing.

Key words: combined processing; electrode brush; modes; working medium; wire; circumferential velocity; wire density; contact; roughness

References

1. Kirillov O.N. “Technology of combined treatment with an unprofiled electrode” (“Tekhnologiya kombinirovannoy obrabotki neprofilirovannykh elektrodom”), monograph, Voronezh State Technical University, 2010, 254 p.
2. Kirillov O.N., Smolentsev V.P., Kotukov E.V., Smolentseva Ya.S. “The electrode brush and the method of its application for removing burrs in the grooves of parts” (“Elektrod-shchetka i sposob yeye primeneniya dlya udaleniya zausentsev v pazakh detaley”), patent 2724215 C1 of the Russian Federation, 2020, byul. 18
3. Kirillov O.N., Smolentsev V.P., Sukhochev G.A., Yukhnevich S.S., Kotukov E.V. “An unprofiled electrode-tool for combined deburring at the junctions of conjugated comb surfaces”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol.18, no. 5, pp. 132-137.

Submitted 14.01.2026; revised 06.02.2026

Information about the authors

Oleg N. Kirillov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kirillov.oll@yandex.ru

Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vsmolen@inbox.ru

Vadim V. Kutz, Dr. Sci. (Technical), Professor, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Двухслойная панель с гофрированным наполнителем для самолётов

М.В. Молод, В.И. Максименков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы по разработке слоистой панели с гофрированным наполнителем. Они применяются в зарубежных и отечественных самолётах и чаще всего применяются в горячей части двигателя. Создание нового типа гофрированной конструкции направлено на повышение их акустической эффективности с учётом требований международного стандарта ИКАО и на уменьшение веса. Представленный базовый вариант панели состоит из двух однослойных конструкций наполнителя, соединённых контактной сваркой. Проведённый анализ существующих двухслойных конструкций выявил необходимость в разработке новых типов слоистых конструкций, обеспечивающих заданные требования по акустической эффективности и весовым параметрам. В результате проведенных исследований разработана гофрированная панель, изготовленная из одного листа. Материалы, применяемые для изготовления слоистых панелей — стальные и алюминиевые сплавы. Исследован технологический процесс изготовления нового типа панелей. Перфорирование обшивки и наполнителя осуществляется в штампах. Для формообразования гофров разработано приспособление, обеспечивающее получение гофров заданных геометрических размеров. Соединение обшивок с гофрированным наполнителем осуществляется контактной сваркой. Приведен метод оценки качества полученной панели испытанием на отрыв. Определена плотность гофрированного наполнителя. Рассмотрена связь плотности с шагом гофра, позволяющая осуществить выбор гофра с заданными характеристиками. Проведены расчеты весовой эффективности конструкции. Построены графики весовой эффективности конструктивных решений гофрированных панелей. Проведены акустические испытания новых конструкций на интерферометре, которые показали, что их эффективность в 1,5 раза больше по сравнению с базовым вариантом конструкции.

Ключевые слова: слоистая конструкция; плотность; перфорация; пуансон; матрица

Введение

Применение гофрированных конструкций в каналах воздухозаборника самолета направлено на повышение акустических характеристик и снижение веса самолета. Данные конструкции находят широкое применение в зарубежных самолетах [1].

Проведённый анализ применяемых слоистых конструкций выявил необходимость в выполнении исследований и разработке новых типов слоистых панелей, обеспечивающих заданные требования по акустическим и весовым параметрам.

Рассмотрена панель с двухслойным гофрированным наполнителем (рис. 1).

В слоистой панели соединение гофрированных слоев осуществляется контактной сваркой (базовый вариант) [2]. Это позволило получить двухслойную гофрированную конструкцию для горячей части двигателя.

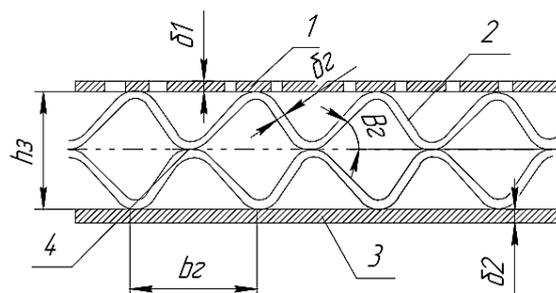


Рис. 1. Двухслойная гофрированная панель: 1) перфорированная обшивка; 2) гофрированный наполнитель первого и второго слоя; 3) сплошная обшивка; 4) зона сварки слоев

Цель работы

Разработать новую конструкцию слоистой панели. Провести исследования по разработке технологий оценки параметров панели с гофрированным наполнителем, обеспечивающей повышенную весовую и акустическую эффективность.

Разработанная слоистая панель представляет собой конструкцию из двух обшивок: сплошной и перфорированной с гофрированным наполнителем между ними (рис. 2) [3].

Гофрированный наполнитель выполняется из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Эта сталь применяется для горячей части двигателя. Для холодной части двигателя используется Д16АТ.

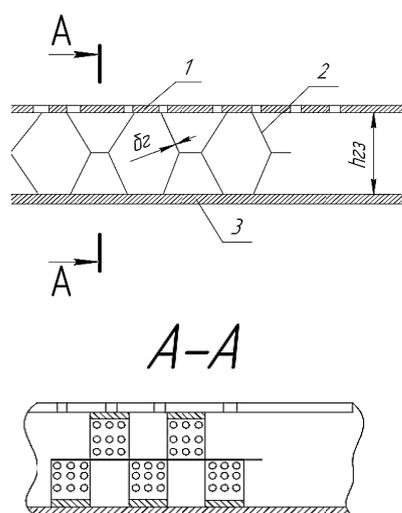


Рис. 2. Гофровая панель: 1) перфорированная обшивка; 2) гофровый наполнитель; 3) сплошная обшивка

Ниже представлена схема технологического процесса изготовления гофровой панели (рис. 3).

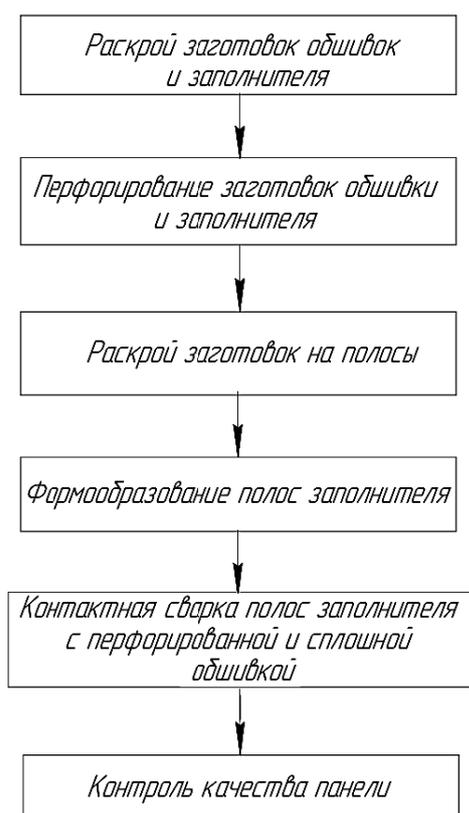


Рис. 3. Технологический процесс изготовления гофровой панели

Перфорация обшивки и заготовки гофрового наполнителя осуществляется в штампе.

Формообразование гофрового наполнителя осуществляется из листа в приспособлении (рис. 4).

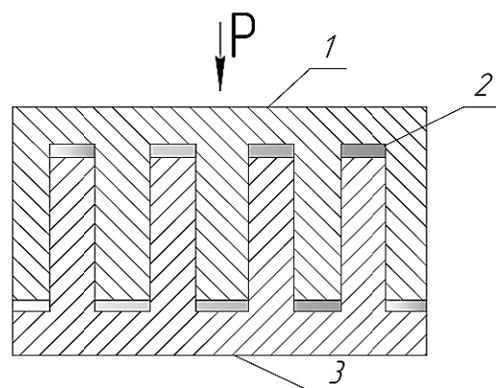


Рис. 4. Приспособление для формообразования гофрового наполнителя: 1) пуансон; 2) гофровый наполнитель; 3) матрица

Гофровый наполнитель после формообразования представлен на рис. 5

Формообразование слоистой панели на заданный радиус кривизны осуществляли в штампе [4].

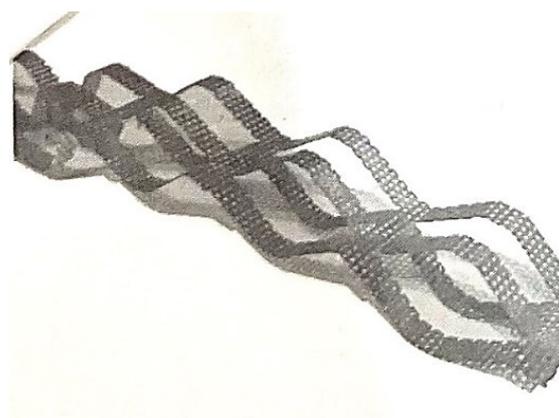


Рис. 5. Гофровый наполнитель после формообразования.

Соединения полученного двухслойного наполнителя с обшивкой осуществляется контактной сваркой (рис. 6).

Испытание на отрыв несущих слоёв от наполнителя позволяет получить сведения о качестве изготовления конструкции с наполнителем и дают возможность оценить прочность соединения контактной сваркой между обшивкой и гофровыми наполнителями. Прочность отрыва определяется по зависимости $\sigma_{отр} = P/F$, где P – максимальное усилие;

F – площадь образца в плане.

Для гофрированной конструкции, полученной при экспериментальных испытаниях образцов $\sigma_{отр} = 4,3$ МПа, что соответствует нормативным требованиям с учётом ГОСТ 11262.

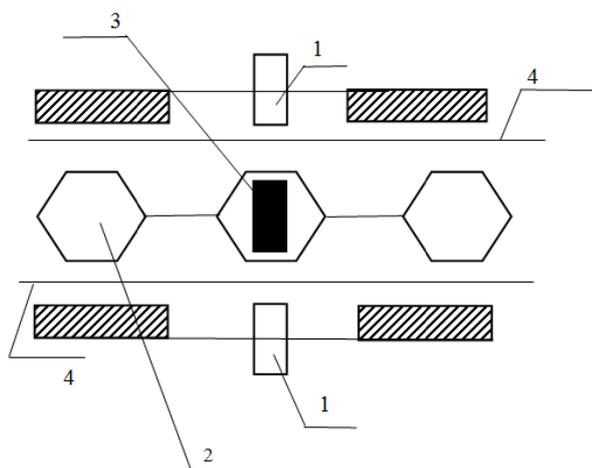


Рис. 6. Сварка двухслойного гофрового заполнителя: 1) сварочный ролик; 2) двухслойный гофровый заполнитель; 3) токопроводные стержни; 4) обшивки

Эти испытания являются обязательными при изготовлении конструкции с гофровым заполнителем (рис. 7).

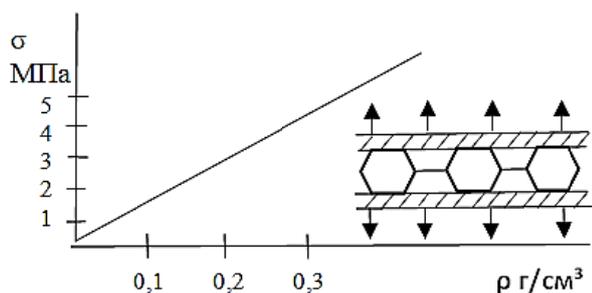


Рис. 7. Зависимость прочности σ от плотности ρ при отрыве несущих слоёв от гофрового заполнителя

Расчет плотности гофрового заполнителя

Проведены расчеты плотности гофрового заполнителя [3]

$$\rho_0 = \left(\frac{P}{H} + K_\beta\right) \frac{\delta_\Gamma}{\rho} \rho_m, \quad (1)$$

- где P – шаг гофрового заполнителя;
 - H – высота гофрового заполнителя;
 - K_β – коэффициент формы гофра;
 - δ_Γ – толщина стенки гофра;
 - ρ_m – плотность материала гофра.
- Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	$\delta_{нс}$, мм	ρ , мм	H , мм	K_β	δ_Γ	ρ_m , г/см ³	ρ_0 , г/см ³
1	1,2	55	15	0,58	0,33	7,9	0,180
2	1,2	55	15+15	0,58	0,3	7,9	0,360

Определена весовая эффективность базового и нового варианта гофровой панели.

Масса несущего слоя определяется:

$$m_{нс} = 2\delta_{нс} \cdot \rho_m, \quad (2)$$

где $\delta_{нс}$ – толщина несущего слоя.

Масса гофрового заполнителя определяется по зависимости:

$$m_{гз} = H \cdot \rho_0. \quad (3)$$

Масса гофровой панели определяется:

$$m_{гп} = m_{нс} + m_{гз}. \quad (4)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Базовый вариант			Новый вариант		
$m_{нс}$	$m_{гз}$	$m_{бп}$	$m_{нс}$	$m_{гз}$	$m_{гп}$
г/см ²					
1,89	1,08	2,97	1,89	0,27	2,16

В таблице масса базового варианта гофровой панели обозначена $m_{бп}$, масса нового варианта гофровой панели - $m_{гп}$. Результаты расчетов представлены ниже на рис. 8.

Акустическая эффективность нового типа гофровой панели определялась на стенде «канал с потоком» в ЦАГИ. Испытания показали, что она в 1,5 раза выше по сравнению с базовым вариантом.

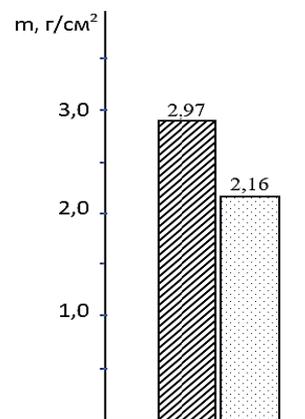


Рис. 8. Оценка весовой эффективности гофровых панелей

Заключение

1. Разработан новый тип гофровой панели, который обеспечивает снижение массы конструкции на 27 %, по сравнению с базовым вариантом, и повышение акустической эффективности в 1,5 раза, полученных при испытании в ЦАГИ на стенде (канал с потоком).

2. Разработан технологический процесс изготовления облегченного варианта гофровой панели, и проведены испытания на отрыв об-

шивок от гофрового заполнителя и расчеты плотности заполнителя с оценкой массы панели.

3. Разработанная конструкция панели может быть реализована в каналах воздухозаборников средне- и дальнемагистральных самолётов для обеспечения Международного стандарта 14 Главы ИКАО.

Литература

1. Обзор зарубежного опыта. Цельносварные сотовые конструкции. НИАТ: 1978. 98 с.

2. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с сотовым заполнителем. Москва, Машиностроение: 1991. 272 с.

3. Максименков В.И., Молод М.В., Коротков А.А. Способ изготовления многослойной панели. Патент на изобретение 2292977 С1, 10.02.2007. Заявка № 2004125830/02А от 24.08.2004. Патентообладатели: ФГУП «Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля», ООО НТЦ «ЗПК».

4. Максименков В.И., Молод М.В., Федосеев В.И. Штамп для формообразования панелей. Патент на изобретение 2707024 С1, 07.11.2019. Заявка № 2019104810 от 20.02.2019. Патентообладатели: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Поступила 13.07.2025; принята к публикации 06.02.2026

Информация об авторах

Молод Марина Владиславовна – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: molodmv@yandex.ru

Максименков Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Double-layer panel with corrugated core for aircraft

M.V. Molod, V.I. Maksimenkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The article discusses the development of a sandwich panel with a corrugated core. These panels are used in both foreign and domestic aircraft, most often in the hot section of an engine. The aim of this new type of corrugated structure is to improve their acoustic performance, taking into account the requirements of the international ICAO standard, and to reduce weight. The presented basic version of the panel consists of two single-layer core structures connected by contact welding. An analysis of existing two-layer structures revealed the need to develop new types of sandwich structures that meet the specified requirements for acoustic performance and weight parameters. As a result of the research, a corrugated panel manufactured from a single sheet was developed. The materials used for the manufacture of sandwich panels are steel and aluminum alloys. The technological process for manufacturing the new type of panel was studied. Perforation of the skin and core is carried out in dies. A device for forming the corrugations was developed, ensuring the production of corrugations of specified geometric dimensions. The skins are connected to the corrugated core using contact welding. A method for assessing the quality of the resulting panel using a pull-off test is presented. The density of the corrugated core is determined. The relationship between density and corrugation pitch is examined, allowing for the selection of corrugations with specified characteristics. Calculations of the weight efficiency of the structure are performed. Graphs of the weight efficiency of the design solutions for the corrugated panels are constructed. Acoustic testing of the new designs using an interferometer showed that their efficiency is 1.5 times greater than that of the baseline design.

Key words: layered panel; density; perforation; punch; matrix

References

1. “Review of foreign experience”, “All-welded honeycomb structures”, NIAT-1978, 98 p.
2. Panin V.F., Gladkov Yu.A. “Structures with honeycomb core” (“Konstruktsii s sotovym zapolnitelem”), Moscow: Masinstroenie, 1991, 272 p.
3. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Korotkov A.A. “Method of manufacture of multilayer panel”, patent no. 2292977 C1, 10.02.2007, Scientific Research Institute of Automated Means of Production and Control, Limited Liability Company NTC “ZPK” 2007, application no. 2004125830/02A dated 24.08.2004
4. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. “Stamp for forming panels” (“Shtamp dlya formobrazovaniya paneley”), invention patent 2707024 C1, 07.11.2019, application no. 2019104810 dated February 20, 2019, patent holders: Voronezh State Technical University.

Submitted 13.07.2025; revised 06.02.2026

Information about the authors

Marina V. Molod, Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: molodmv@yandex.ru

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Моделирования магнитного поля при магнитном методе неразрушающего контроля зубьев зубчатого колеса

Ю.В. Креселюк, В.А. Витренко

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия

Аннотация. Выполнено моделирование взаимодействия магнитного поля с зубьями зубчатого колеса (ЗК) при магнитном методе неразрушающего контроля в программе ELCUT. Прибором для неразрушающего контроля использовался П-образный электромагнитный датчик, а в качестве магниточувствительного преобразователя для получения выходного информационного сигнала использовался феррозонд. Приведены характеристики датчика и зубчатого колеса, на основе которых были созданы их модели в программе. На основе полученной картины поля определено, что при наличии дефекта зуба происходят искажения силовых линий, появляются поля рассеяния в зонах нарушения сплошности материала. Получены графики зависимости напряженности магнитного поля от угла поворота ЗК. Амплитудное значение напряженности магнитного поля является важнейшей характеристикой при определении неисправности зуба ЗК, для каждого исправного зуба амплитудное значение напряженности магнитного поля имеет одинаковые значения. Если сигнал отклоняется от значений исправных зубьев ЗК, тогда можно идентифицировать дефект зуба. На основе анализа напряженности магнитного поля появляется возможность производить неразрушающий контроль зубчатых колес в процессе эксплуатации, что необходимо для оборудования, где выход из строя ЗК приводит к остановке производства и чрезвычайным ситуациям.

Ключевые слова: магнитное поле; ELCUT; неразрушающий контроль; зубчатое колесо; напряженность магнитного поля; электромагнитный датчик

Введение

Зубчатые колёса (ЗК) являются ключевым элементом множества механических систем, от их состояния напрямую зависит работоспособность и безопасность оборудования. Они обеспечивают передачу и преобразование вращательного движения между валами, позволяя регулировать скорость, крутящий момент и направление вращения. Без ЗК невозможно функционирование коробок передач, редукторов, конвейеров, турбин, подъёмных механизмов и многих других узлов [1, 2].

Поддержание исправного состояния ЗК критически важно, поскольку даже незначительные отклонения (погрешности шага, профиля, шероховатость поверхности, микротрещины) приводят к повышенному шуму, вибрации, ускоренному износу, заклиниванию и аварийным отказам оборудования.

Контроль геометрии, качества поверхности и механических свойств ЗК на этапах производства, монтажа и эксплуатации позволяет гарантировать плавность хода, точность кинематики и длительный ресурс оборудования, что в итоге снижает эксплуатационные затраты и предотвращает дорогостоящие простои в современной промышленности.

Одним из методов контроля состояния ЗК является неразрушающий контроль. Неразрушающий контроль — совокупность методов оценки состояния объектов без нарушения их целостности и эксплуатационной пригодности [3].

Магнитный метод неразрушающего контроля основан на анализе искажений магнитного поля в зоне дефекта [4]. При намагничивании объекта дефекты (трещины, включения, расслоения) вызывают:

- перераспределение магнитных потоков;
- формирование полей рассеяния;
- локальные изменения магнитной проницаемости.

Напряжённость магнитного поля при неразрушающем контроле зубьев ЗК зависит от наличия и характеристик дефекта. Дефект искажает магнитное поле, что приводит к изменению его параметров в зоне повреждения [5].

Постановка задачи

Целью данной работы является моделирование взаимодействия магнитного поля, созданного электромагнитным датчиком, и анализ его взаимодействия с зубьями ЗК при магнитном методе неразрушающего контроля. Полученная модель позволит определить значение

напряженности в зоне расположения магниточувствительного преобразователя и получить зависимости как для исправного ЗК, так и для ЗК с дефектом. При анализе значения напряженности и характера его изменения при вращении ЗК появляется возможность сделать выводы о характере дефекта.

Инструменты и методика измерений

Для моделирования магнитного поля использовалась программа ELCUT. Программа ELCUT - отечественный программный пакет для инженерного моделирования физических полей методом конечных элементов, широко применяемый для расчёта и анализа магнитных полей [6, 7]. В рамках моделирования магнитного поля ELCUT позволяет решать линейные и нелинейные задачи магнитостатики, анализировать поля переменных токов и нестационарные процессы. Результаты визуализируются в виде картин поля, а интегральный калькулятор даёт возможность получать численные значения на выбранных контурах и поверхностях.

Неразрушающий контроль зубьев ЗК проводится с использованием электромагнитного датчика, размещающегося непосредственно над зубом. Датчик создает магнитное поле, и на основании анализа взаимодействия с зубьями ЗК появляется возможность определить дефект [8].

С помощью П-образного датчика при магнитном неразрушающем контроле ЗК возможно определить ошибки зацепления, износа зуба и его отсутствие, а также изменение геометрии зуба ЗК [9].

В качестве магниточувствительного преобразователя для получения выходного информационного сигнала в датчике используется феррозонд. При использовании феррозондов в качестве магниточувствительных элементов, которые по сравнению с гальваномагнитными элементами имеют меньший порог чувствительности, можно увеличить зазор между датчиком и поверхностью ЗК. Мощность выходных сигналов феррозондов имеет энергетический уровень $P = 0,2 \cdot 10^{-5} \dots 0,5 \cdot 10^{-5}$ Вт, что позволяет использовать датчик при высоком уровне промышленных магнитных и электромагнитных помех [10].

В программе был смоделирован П-образный датчик с геометрическими параметрами, показанными на рис. 1.

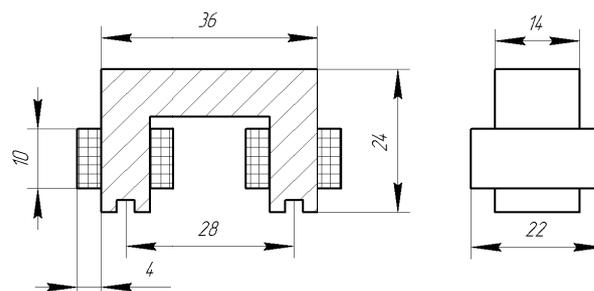


Рис. 1. Геометрические размеры П-образного датчика, используемого в моделировании

Датчик расположен над ЗК, и в месте размещения феррозонда проводился замер значений напряженности магнитного поля при различных вариантах поворота ЗК.

В программе ELCUT для электромагнитного датчика был задан ток источника поля 1 А и относительная магнитная проницаемость магнитопровода 2000, зубчатое колесо модулем 4 мм и числом зубьев 73, и заданным параметром относительной магнитной проницаемостью 5000.

Полученная картина поля при перемещении исправного зуба ЗК в поле магнитного датчика, смоделированная в программе ELCUT, показана на рис. 2.

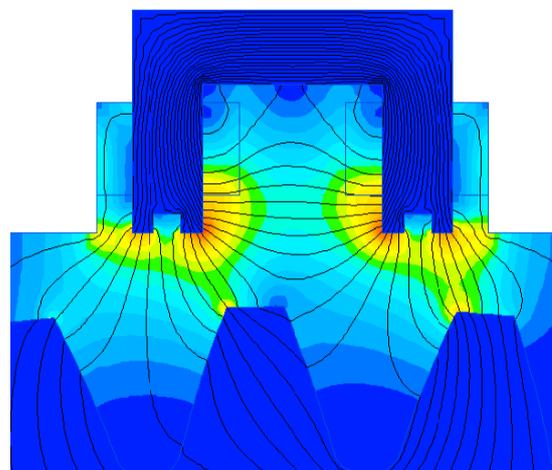


Рис. 2. Картина поля, полученная в программе ELCUT

Анализ результатов измерений

Рассмотрим картину магнитного поля при неразрушающем контроле зубьев ЗК, смоделированного в программе ELCUT, для исправного ЗК.

Картина магнитного поля при повороте ЗК на угол 0,1 радиан показана на рис. 3. При дальнейшем увеличении угла поворота ЗК картина магнитного поля имеет одинаковый вид и значения и далее не приводится.

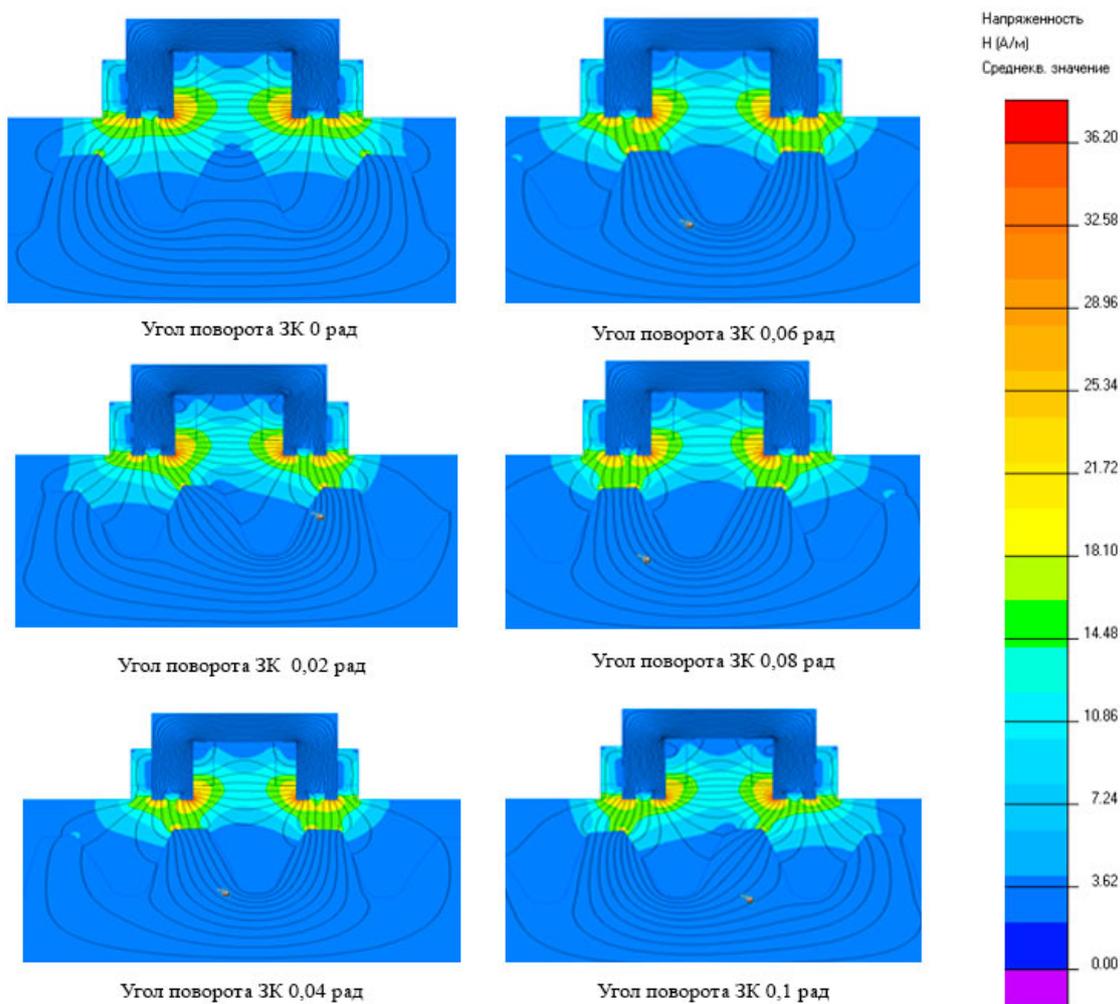


Рис. 3. Картина магнитного поля при поворотах исправного ЗК

Картина магнитного поля при угле поворота ЗК на 0,1 радиан демонстрирует криволинейное распределение изолиний, исходящих из области расположения ЗК и расходящихся в окружающее пространство, при этом линии сгущаются вблизи ЗК и постепенно размываются по мере удаления от него. При угле поворота ЗК на 0,1 радиан максимальная напряжённость сосредоточена в непосредственной близости к ЗК, а по мере удаления от ЗК происходит снижение напряжённости. Зоны максимальной напряжённости локализованы симметрично по обе стороны от ЗК, а зоны минимальной напряжённости находятся на значительном удалении от ЗК. Симметричность распределения магнитного поля непосредственно указывает на исправное состояние зубьев ЗК.

Значения напряженности в разные моменты поворота исправного ЗК относительно датчика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения напряженности магнитного поля датчика при исправном ЗК

φ, рад	H, А/м	φ, рад	H, А/м	φ, рад	H, А/м
0,00	9,366	0,14	7,537	0,28	7,998
0,02	8,315	0,16	7,998	0,30	9,366
0,04	7,537	0,18	9,011	0,32	8,315
0,06	7,998	0,20	9,366	0,34	7,538
0,08	9,012	0,22	8,315	0,36	7,998
0,10	9,366	0,24	7,537	0,38	9,013
0,12	8,315	0,26	7,998	0,40	9,366

Рассмотрим магнитное поле и зависимость напряженности, измеряемой датчиком при прохождении неисправного ЗК с дефектом поломки зуба.

Картина магнитного поля при вращении неисправного ЗК на угол 0,2 радиана приведена на рис. 4. При вращении ЗК от 0,20 до 0,40 рад картина магнитного поля имеет зеркальное значение и далее не приводится.

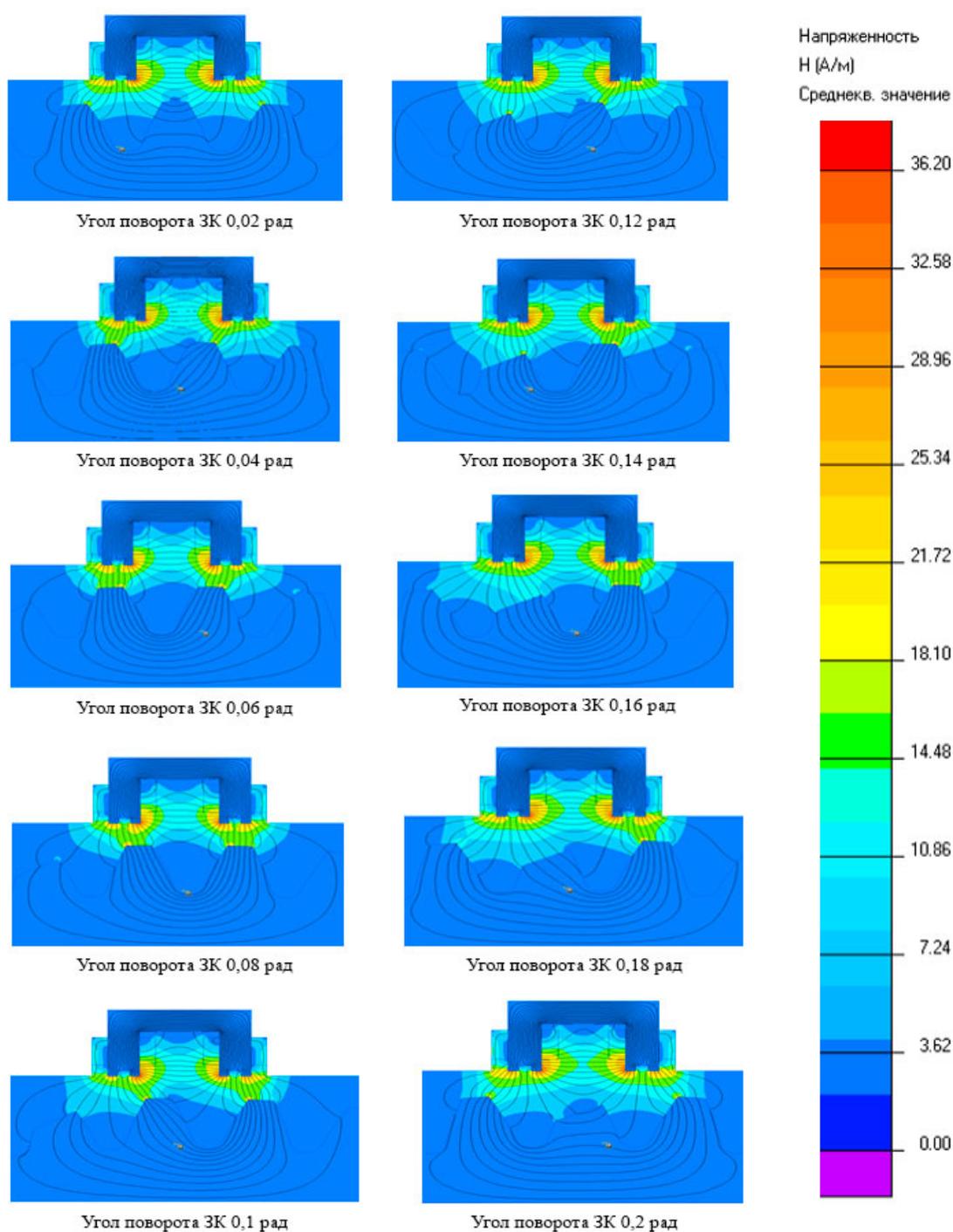


Рис. 4. Картина магнитного поля при поворотах ЗК с дефектом поломки зуба

Картина магнитного поля при повороте исправного ЗК демонстрирует выраженное искажение конфигурации силовых линий по сравнению с меньшими углами поворота – они становятся менее симметричными, что может свидетельствовать о наличии дефектов в зубьях ЗК. При повороте ЗК с дефектом поломки зуба на 0,2 радиан зоны максимальной напряжённости локализованы асимметрично относительно оси ЗК, что связано непосредственно

с дефектом ЗК. Асимметрия распределения поля является одним из ключевых признаков наличия отклонения от нормальной картины поля с исправным ЗК и указывает на наличие дефекта в зубе ЗК.

Значения напряженности в разные моменты поворота исправного ЗК с дефектом поломки зуба относительно датчика приведены в табл. 2 при повороте ЗК до значения 0,4 рад.

Таблица 2
Значения напряженности магнитного поля датчика при дефекте поломки зуба ЗК

φ, рад	H, А/м	φ, рад	H, А/м	φ, рад	H, А/м
0,00	9,366	0,14	7,537	0,28	9,014
0,02	8,315	0,16	7,998	0,30	9,366
0,04	7,537	0,18	8,252	0,32	8,315
0,06	7,998	0,20	8,314	0,34	7,537
0,08	9,012	0,22	8,055	0,36	7,9985
0,10	9,366	0,24	7,537	0,38	9,015
0,12	8,315	0,26	7,998	0,40	9,366

На основании полученных данных (табл. 1) построим график изменения напряженности магнитного поля от угла поворота исправного ЗК, показанный на рис. 5.

По данным графика видно, что процесс изменения значения напряженности фиксируемого датчиком при прохождении зуба исправного ЗК имеет синусоидальную форму. Амплитудные значения напряженности магнитного поля для каждого зуба идентичны, это обусловлено одинаковой геометрией каждого зуба ЗК.

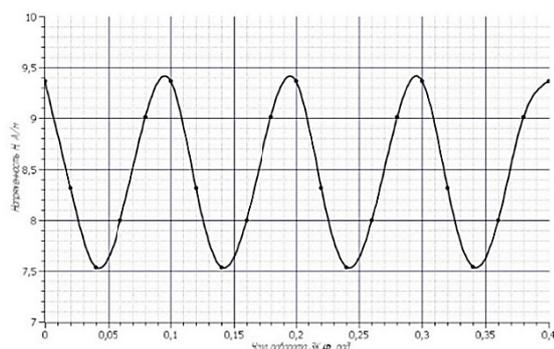


Рис. 5. График изменения напряженности магнитного поля от угла поворота исправного ЗК

По данным табл. 2 построим график, показанный на рис. 6, изменения значения напряженности магнитного поля фиксируемого датчиком от угла поворота ЗК с дефектом поломки зуба.

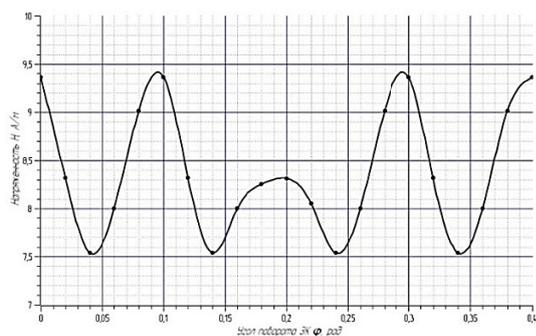


Рис. 6. График изменения напряженности магнитного поля от угла поворота ЗК с дефектом поломки зуба

Исходя из полученных графиков (рис. 5, б) видно, что амплитудное значение напряженности магнитного поля является важнейшей характеристикой при определении неисправности зуба ЗК.

Для более точной идентификации дефекта требуется проводить сравнение данных с исправным ЗК, при дефектах напряженность магнитного поля меняется характерно и позволяет идентифицировать дефект с большой точностью.

Выводы

На основе полученной картины поля видно, что при наличии дефекта зуба ЗК происходят искажения силовых линий, появляются поля рассеяния в зонах нарушения сплошности материала. Дефект нарушает равномерное распределение магнитного потока, формируя «отпечаток» в виде характерной картины поля, которую датчик фиксирует и преобразует в информационный сигнал.

В процессе вращения ЗК в поле электромагнитного датчика при неразрушающем контроле происходят изменения напряженности магнитного поля. В исправном ЗК сигнал каждого зуба остается одинаковым, если в зубе ЗК имеется дефект, то в сигнале происходят характерные изменения.

Исходя из полученных графиков зависимостей напряженности магнитного поля от угла поворота ЗК, можно сделать вывод, что амплитудное значение напряженности магнитного поля является важнейшей характеристикой при определении неисправности зуба ЗК. Для каждого зуба исправного ЗК амплитудное значение напряженности магнитного поля имеет одинаковые значения. Если сигнал отклоняется от значений исправных зубьев ЗК, тогда можно идентифицировать дефект зуба.

На основе вышесказанных выводов, имеется возможность производить неразрушающий контроль ЗК в процессе эксплуатации, что необходимо для оборудования, где выход из строя ЗК приводит к остановке производства и чрезвычайным ситуациям.

Прежде всего, контроль ЗК в процессе эксплуатации актуален для промышленного оборудования с критическими механизмами передачи движения. Например, в станках с ЧПУ, где дефект ЗК может привести к остановке производственного цикла и повреждению дорогостоящих заготовок. Также возможно применение на конвейерных линиях пред-

приятый для контроля состояния редукторов и приводных механизмов.

В сфере энергетики и электротехники возможно применение в турбогенераторах и редукторах на электростанциях, где ранняя диагностика дефектов помогает избежать аварий и отключения энергоснабжения. Контроль состояния зубьев ЗК возможно использовать для ветрогенераторов, где необходимо контролировать состояние редукторов в условиях вибраций и переменных нагрузок.

В системах безопасности и аварийного отключения данный метод позволяет контролировать состояние зубчатых передач в механизмах аварийных тормозов и блокировок, гарантируя их срабатывание в критической ситуации.

Литература

1. Морозов А.В., Макеев А.А., Петряков С.Н. Анализ условий эксплуатации и характер износа рабочих поверхностей зубчатых колёс и шестерён // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х т., Ульяновск, 23 июня 2020 года. Том 2020-2. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2020. С. 262-265.

2. Особенности износа и методы восстановления зубчатых колёс / А.М. Мухин, Е.Ю. Жигулин, К.А. Лезов, И.В. Титова // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 75-й нац. науч.-практ. конф. студентов и магистрантов, Воронеж, 15 февраля – 31 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I, 2024. С. 214-218.

3. Крутилин А.А., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Организация контроля качества. Неразрушающие методы контроля прочности. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2022. 112 с.

4. Максимов А.Б., Гадеев А.В. Применение неразрушающего метода коэрцитиметрии для определения ресурса стали // Технический сервис машин. 2025. Т. 63. № 2. С. 52-58.

5. Ивженко А.А., Креселюк Ю.В., Рублева Ю.В. Определение дефектов деталей тележек грузовых вагонов феррозондовым методом // Вестник Луганского государственного университета им. Владимира Даля. 2023. № 3(69). С. 229-231.

6. Линейцева К.В., Пестряков М.В., Пионкевич В.А. Моделирование электротехнических устройств и процессов в комплексах MATLAB и ELCUT. Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 180 с.

7. Моделирование процесса нагрева проводов линии электропередачи в программной среде Elcut / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко, Е.Ю. Тряпкин, А.И. Пухова // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 1. С. 22-35.

8. Яковенко В.В., Креселюк Ю.В., Ивженко А.А. Оптимизация магнитной системы датчика частоты вращения зубчатых колес транспортных машин // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2019. № 2(20). С. 197-200.

9. Креселюк Ю.В. Анализ проблем механических редукторов транспортных систем и их решение с помощью магнитного датчика // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. № 4. С. 561-570.

10. Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитный шум феррозондов и магнитомодуляционных датчиков с аморфным ферромагнитным сердечником // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 5. С. 126-130. DOI 10.31857/S0032816221050128.

Поступила 14.01.2026; принята к публикации 06.02.2026

Информация об авторах

Креселюк Юрий Владимирович – старший преподаватель кафедры электромеханики, Луганский государственный университет им. В. Даля (291034, Россия, Луганская Народная Республика, г. Луганск, квартал Молодежный, 20А), e-mail: yurakreselyuk@mail.ru, ORCID: 0009-0008-2919-7472

Витренко Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга, Луганский государственный университет им. В. Даля (291034, Россия, Луганская Народная Республика, г. Луганск, квартал Молодежный, 20А), e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

Simulation of the magnetic field using the magnetic method of non-destructive testing of gear teeth

Yu.V. Kreselyuk, V.A. Vitrenko

Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, Russia

Abstract. The interaction of a magnetic field with the teeth of a gear wheel is modeled using the magnetic method of non-destructive testing in the ELCUT program. A U-shaped electromagnetic sensor was used as a non-destructive testing device, and a ferrosonde was used as a magnetically sensitive transducer to obtain the output information signal. The characteristics of the sensor and the gear wheel are given, on the basis of which their models were created in the program. Based on the obtained field pattern, it was found that in the presence of a tooth defect, the lines of force are distorted, scattering fields appear

in areas of discontinuity of the material. Graphs of the dependence of the magnetic field strength on the rotation angle of the ZK are obtained. The amplitude value of the magnetic field strength is the most important characteristic in determining the malfunction of a tooth. For each serviceable tooth, the amplitude value of the magnetic field strength has the same values. If the signal is rejected from the values of the working teeth of the ZK, then a tooth defect can be identified. Based on the analysis of the magnetic field strength, it becomes possible to perform non-destructive testing of gears during operation, which is necessary for equipment where the failure of the control system leads to a shutdown of production and emergencies.

Key words: magnetic field; ELCUT; non-destructive testing; gear wheel; magnetic field strength; electromagnetic sensor

References

1. Morozov A.V., Makeev A.A., Petryakov S.N. "Analysis of operating conditions and the nature of wear on the working surfaces of gears and gears", *Proc. of the X Int. Sci. and Pract. Conf.: Agricultural Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems and Solutions (Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya)*, June 23, 2020, vol. 2020-2, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, pp. 262-265.
2. Mukhin A.M., Zhigulin E.Yu., Lezov K.A., Titova I.V. "Features of wear and methods of gear wheel restoration", *Proc. of the 75th National Sci. and Pract. Conf. of Students and Undergraduates: Youth Vector of Agricultural Science Development (Molodezhny vektor razvitiya agrarnoy nauki)*, Voronezh, February 15-31, 2024, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024, pp. 214-218.
3. Krutinin A.A., Inkova N.A., Pakhomova O.K. "Organization of quality control. Non-destructive strength testing methods" ("Organizatsiya kontrolya kachestva. Nerazrushayushchie metody kontrolya prochnosti"), Volgograd State Technical University, 2022, 112 p.
4. Maksimov A.B., Gadeev A.V. "Application of the non-destructive method of coercitometry to determine the life of steel", *Technical Service of Machines (Tekhnicheskij servis mashin)*, 2025, vol. 63, no. 2, pp. 52-58.
5. Ivzhenko A.A., Kreselyuk Yu.V., Rubleva Yu.V. "Determination of defects in truck parts of freight wagons by the ferrosonde method", *Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl (Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta im. Vladimira Dalya)*, 2023, no. 3(69), pp. 229-231.
6. Linintseva K.V., Pestryakov M.V., Pionkevich V.A. "Modeling of electrotechnical devices and processes in MATLAB and ELCUT complexes" ("Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv i protsessov v kompleksakh MATLAB i ELCUT"), Irkutsk National Research Technical University, 2022, 180 p.
7. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Tryapkin E.Yu., Pukhova A.I. "Modeling of the heating process of power transmission line wires in the Elcut software environment", *Scientific Works of KubSTU (Elektronnyy setevoy politematicheskij zhurnal «Nauchnye trudy KubGTU»)*, 2022, no. 1, pp. 22-35.
8. Yakovenko V.V., Kreselyuk Yu.V., Ivzhenko A.A. "Optimization of the magnetic system of the gear speed sensor for transport vehicles", *Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl (Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta im. Vladimira Dalya)*, 2019, no. 2(20), pp. 197-200.
9. Kreselyuk Yu.V. "Analysis of problems of mechanical gearboxes of transport systems and their solution using a magnetic sensor", *News of the St. Petersburg University of Communications (Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya)*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 561-570.
10. Sokol-Kutylovsky O.L. "Magnetic noise of ferrosondes and magnetomodulation sensors with an amorphous ferromagnetic core", *Instruments and Experimental Techniques (Pribory i tekhnika eksperimenta)*, 2021, no. 5, pp. 126-130.

Submitted 14.01.2026; revised 06.02.2026

Information about the authors

Yuriy V. Kreselyuk, Assistant Professor, V. Dahl Lugansk State University (20A Molodezhny Block, Lugansk City District, Lugansk People's Republic, 291034, Russia), e-mail: yurakreselyuk@mail.ru, ORCID: 0009-0008-2919-7472

Vladimir A. Vitrenko, Dr. Sci. (Technical), Professor, V. Dahl Lugansk State University (20A Molodezhny Block, Lugansk City District, Lugansk People's Republic, 291034, Russia), e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

Механизм управления процессом отработки производственной технологичности для наукоемких изделий машиностроения

В.П. Смоленцев, О.В. Уразов, В.Р. Петренко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Приведены структура механизма и математическая модель управления процессом отработки производственной технологичности по разработанному алгоритму. В нем в качестве инструмента управления использован принцип полезности, что позволило разработать численные методы и программы решения поставленных задач, сократить сроки обоснования целесообразности назначения оптимальных видов воздействий в комбинированных технологических процессах с учетом ограничений для их использования. Приведено обоснование назначения физико-технических процедур, базирующихся на электрических методах обработки, включая механическое упрочнение, обеспечивающее правомерность реализации ресурса испытуемого узла с показателем не ниже требуемого для всего изделия при его безотказной эксплуатации в наукоемком машиностроении. Результативность расчетов по алгоритму подтверждена примерами его использования на типовых деталях трансмиссий и магистралей авиакосмической и энергетической отраслей машиностроения. Так длительность безотказной работы силового привода винта вертолета после оптимизации назначения комплекса физико-технологических воздействий возросла на несколько порядков и проблема его применения в технологии обработки внутренних поверхностей была успешно решена. Применение комбинированных методов обработки, где в качестве полезного воздействия использовано пластическое упрочнение магистралей высокого давления, работающих на атомных электрических станциях, доказало возможность значительного сокращения сроков простоя блоков станций на регламентные работы и открыло пути автоматизации операций для снижения времени пребывания исполнителей в потенциально опасной зоне.

Ключевые слова: производственная технологичность; алгоритмизация; управление; моделирование; обоснованность; ресурс

Введение

Последовательность выполнения расчетных и производственных операций проводится по алгоритму, который включает несколько последовательных этапов, позволяющих моделировать процесс с упрочнением зоны обработки при различных ограничениях для реализации вариантов проведения операций.

На первом этапе анализируются исходные данные, представляемые, как правило, заказчиком изделия. Это могут быть технические, эксплуатационные условия, тактико-технические требования, ограничения по возможностям изготовления, времени на разработку, освоение, запуск в серийное производство, программы выпуска объектов, трудо- и энергозатраты, финансовые вложения. Для всех этапов обосновывается выбор типового объекта [1], способы повышения эксплуатационных свойств изделий с применением принципа полезности, эффективность его использования на стадии упрочнения поверхностного слоя, анализируются ограничения использо-

вания известных способов и, при возможности, предлагаются мероприятия по их частичному или полному устранению в текущий момент или в перспективе.

Далее [2, 3] обоснованы и научно доказаны эффективные направления проведения исследований для усиления роли каждого воздействия, включая упрочнение и его совместимость с комбинированным технологическим процессом, предложена процедура проектирования типовых средств технологического оснащения, приведены объективные доказательства правомерности предложенных мероприятий [4], основанных на современных достижениях технологической науки, патентах на изобретения [5] и опыте применения упрочняющих операций [6, 4] для ведущих отраслей машиностроения страны и за рубежом.

Структура и алгоритм моделирования процесса отработки производственной технологичности

В алгоритме моделирования системы управления процессом отработки производственной технологичности при выпуске высоко-ресурсных, наукоемких изделий, представлен-

ном на рис. 1, показана структура механизма и модель процесса ее отработки за период жизненного цикла изделий авиакосмической и атомной энергетической отрасли машиностроения.

В качестве граничных условий для проектирования и использования модели были ис-

пользованы численные показатели, приведенные в исходных данных, результаты научных исследований по отработке технологичности, показана возможность освоения выпуска продукции при различных видах производства в текущий момент времени и на перспективу.

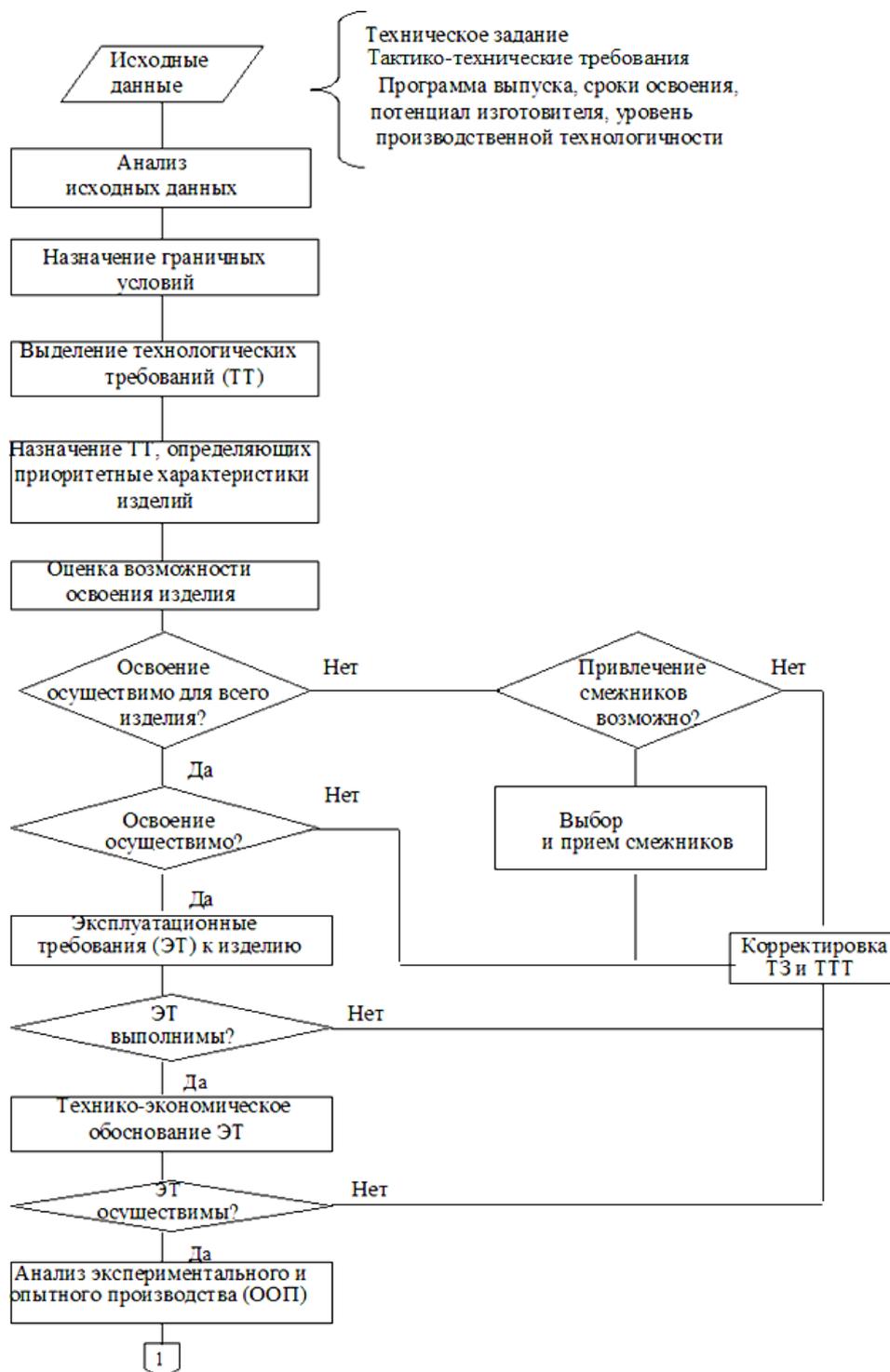


Рис. 1. Алгоритм модели для управления отработкой производственной технологичности при выпуске высокоресурсных наукоемких изделий (начало)

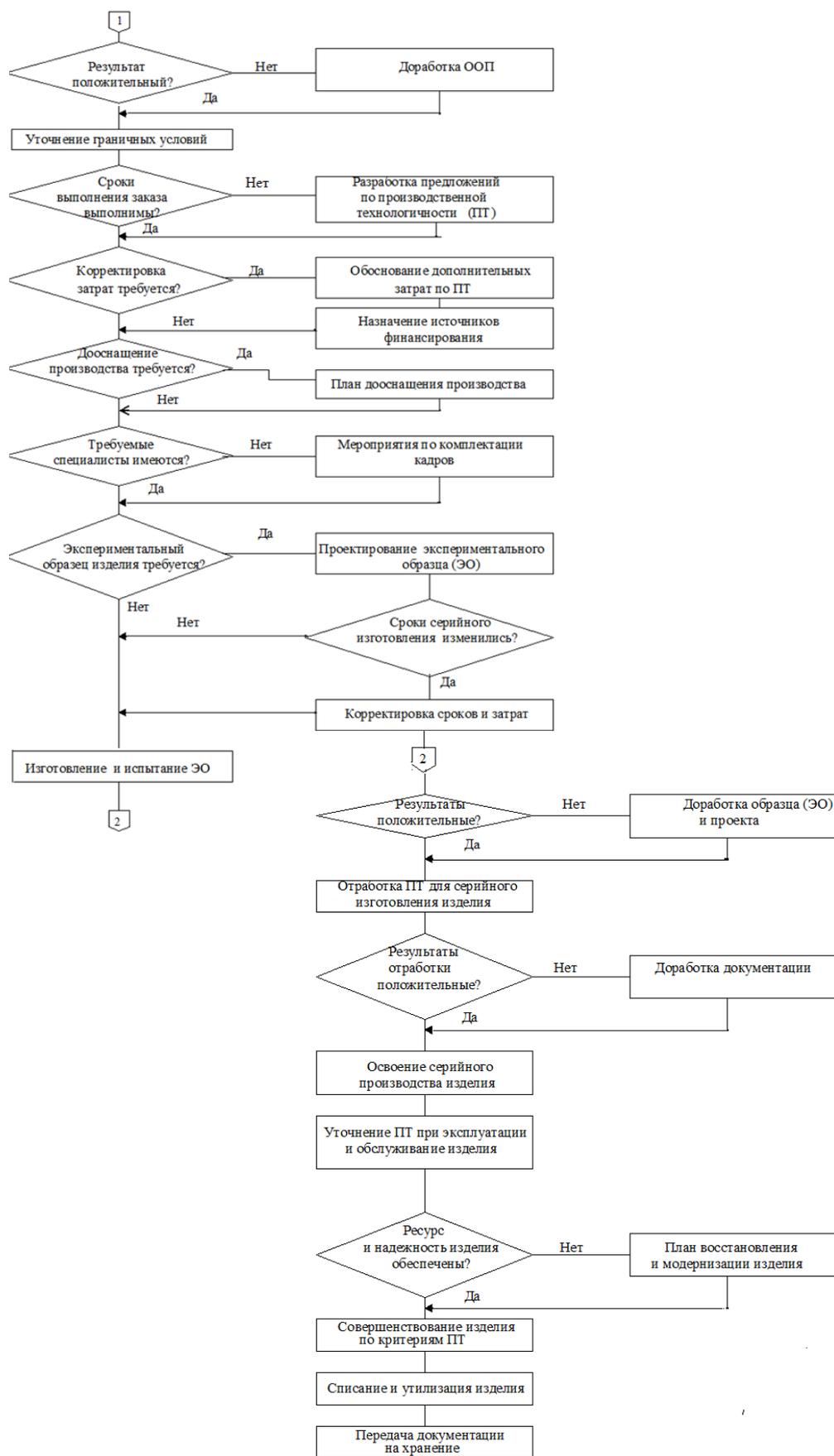


Рис. 1. Алгоритм модели для управления отработкой производственной технологичности при выпуске высокоресурсных наукоемких изделий (окончание)

По анализу материалов на рис. 1 возможна корректировка и уточнение технического задания и тактико-технических требований, что может относиться к технологичности всего изделия и потребовать значительного пересмотра выполненных этапов отработки производственной технологичности. Это включает переоснащение предприятий под новую продукцию, решение вопросов комплектации изготовителей инженерно-техническими и рабочими кадрами, организационные действия по выбору, назначению внешних поставщиков,

соисполнителей, мероприятия и планы по технике безопасности при работе с потенциально опасной продукцией.

Результаты использования процесса отработки производственной технологичности в наукоемких отраслях отечественного машиностроения

На рис. 2 приведен наиболее нагруженный концевой участок вала трансмиссии летательного аппарата, который ограничивал межремонтный период редуктора.



Рис. 2. Вал трансмиссии от редуктора к воздушному винту

После комбинированной чистовой обработки вала на рис. 2 с пластическим наклепом внутренней поверхности на глубину 0,08 мм было достигнуто ее упрочнение на 18–20 %, что позволило повысить усталостную долговечность на базе $2 \cdot 10^7$ более, чем в 2 раза, превысить установленный для узла ресурс и открыть возможность дальнейшего повышения этого показателя редуктора.

Из трубы компенсатора давления (рис. 3) Нововоронежской атомной станции были изготовлены и испытаны на усталостную долговечность образцы.



Рис. 3. Темплет трубопровода $\varnothing 426 \times 40$ мм в месте сварки элементов из легированных сталей 10ГН2МФА+08Х19Н10Г2Б

Проведенные испытания образцов из темплета на рис. 3 показали, что даже ускоренные исследования, проведенные на базе $3,05 \cdot 10^4$ циклов, после упрочнения дали возможность

обеспечить значительное повышение их долговечности более чем в 10 раз с получением управляемого наклепа поверхностного слоя на глубину до 0,08 мм. Наблюдаемые ранее на образцах из темплета на рис. 3 подповерхностные микротрещины и растравливания полностью устранялись, поэтому даже при ускоренных испытаниях появилась возможность пересмотреть ресурс магистралей в сторону его увеличения.

Заключение

Разработанный алгоритм охватывает полный период жизненного цикла исследуемых узлов изделий и служит основой для расширения области использования новых технологических приемов для управления и планирования производством во всех отраслях машиностроения.

Литература

1. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М.: Машиностроение. 1978. 176 с.
2. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 6(168). С. 11-18.
3. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: Изд. дом ВГУ. 2015. 232 с.
4. Уразов О.В., Данилов А.Д. Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного

наклепа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 1. С. 140-146.

5. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК В24В 39/04. Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны поврежде-

ния сварных соединений / Данилов А.Д., Уразов О.В. // 2025. Бюл. изобр. № 4.

6. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов на Дону: Изд. центр ДГТУ. 1998. 624 с.

Поступила 12.01.2026; принята к публикации 08.02.2026

Информация об авторах

Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vsmolen@inbox.ru

Уразов Олег Владимирович – инженер-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 201174UOV@mail.ru

Петренко Владимир Романович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: petrenko@vorstu.ru

A mechanism for controlling the process of testing production adaptability for high-tech engineering products

V.P. Smolentsev, O.V. Urazov, V.R. Petrenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Here we present the structure of the mechanism and a mathematical model for controlling the process of testing production adaptability according to the developed algorithm. It uses the principle of utility as a management tool, which made it possible to develop numerical methods and programs for solving tasks and reduce the time required to justify the feasibility of assigning optimal types of impacts in combined technological processes, taking into account the limitations for their use. We given the rationale for the appointment of physico-technical procedures based on electrical processing methods, including mechanical hardening, which ensures the legality of realizing the life of the test unit with an indicator not lower than that required for the entire product during its trouble-free operation in high-tech engineering. The effectiveness of calculations using the algorithm is confirmed by examples of its use on typical transmission parts and highways in the aerospace and energy industries of mechanical engineering. Thus, the duration of trouble-free operation of the helicopter's propeller drive after optimizing the purpose of the complex of physical and technological effects increased by several orders of magnitude and the problem of their application in the technology of processing internal surfaces was successfully solved. Working out the stages of production adaptability while improving the design and production of helicopter rotor blade spars has become an effective way to improve the quality of products that ensure their priority at the global level of aviation technology. The use of combined processing methods, where plastic hardening of high-pressure pipelines operating at nuclear power plants was used as a beneficial effect, proved the possibility of significantly reducing the downtime of plant units for routine maintenance and opened up ways to automate operations to reduce the time spent by performers in a potentially dangerous area.

Key words: production adaptability; algorithmization; management; modeling; validity; esource

References

1. Smolentsev V.P. "Technology of electrochemical treatment of internal surfaces" ("Tekhnologiya elektrokhimicheskoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey"), Moscow: Masinostroenie, 1978, 176 p.
2. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. "Ensuring the quality of aerospace engineering products at the stages of testing the manufacturability of products", *High-Tech Technologies in Mechanical Engineering (Naukoyemkie tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2025, no. 6(168), pp. 11-18.
3. Safonov S.V. "Technological support of operational characteristics of products" ("Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy"), Voronezh: Publishing House of VSU, 2015, 232 p.
4. Urazov O.V., Danilov A.D. "Technical complex for the repair of surface damage to pipelines by surface riveting", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 140-146.
5. Danilov A.D., Urazov O.V. "Automated device for surface hardening of the damage zone of welded joints" ("Avtomatizirovannoe ustroystvo dlya poverkhnostnogo uprochneniya zony povrezhdeniya svarnykh soyedineniy"), utility model patent no. RU 231708 U1, 02.06.2025, IPC B24B 39/04, 2025, bull. 4.
6. Babichev A.P., Babichev I.A. "Fundamentals of vibration technology" ("Osnovy vibratsionnoy tekhnologii"), Rostov-on-Don: Publishing center of DSTU, 1998, 624 p.

Submitted 12.01.2026; revised 08.02.2026

Information about the authors

Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vsmolen@inbox.ru

Oleg V. Urazov, Research Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: 201174UOV@mail.ru

Vladimir R. Petrenko, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: petrenko@vorstu.ru

Теплофизические процессы в термодинамической системе «инструмент-заточной круг»

В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассматривается разработка математической модели формирования температуры в термодинамической системе «инструмент-заточной круг» с учётом непрерывного возобновления на поверхности инструмента йодидов железа, формирующихся в процессе химической реакции разложения диiodида хрома в условиях высокой температуры в зоне обработки. Диiodид хрома может применяться в процессе обработки как в качестве импрегнатора абразивного инструмента, так и в качестве присадки к подаваемому смазочно-охлаждающему технологическому средству для снижения коэффициента трения и снижения теплонапряжённости процесса обработки. Процесс заточной операции сопровождается интенсивным тепловыделением и ведёт к образованию прижогов и других дефектов на поверхности металлорежущего инструмента, в связи с чем возникает необходимость оценки температуры в процессе заточной операции с применением диiodида хрома. В основу математической модели процесса положена стержневая модель пары трения. Полученная математическая модель учитывает геометрические параметры заточного круга, режимы заточки и такие термодинамические характеристики контактирующих материалов, как теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность, и может быть применена как для случая заточки инструментов из быстрорежущих сталей, так и для случая заточки твердосплавных пластин.

Ключевые слова: заточка; диiodид хрома; йодид железа; температура резания; коэффициент трения; быстрорежущая сталь; твёрдый сплав

Введение

В технологии машиностроения широко известным является негативное влияние температурного фактора, сопровождающего полный цикл лезвийной, абразивной и пластической обработки деталей машин. Особое влияние данный фактор оказывает на процесс заточной операции. Согласно работе [1], высокая теплонапряжённость процесса абразивной обработки является причиной появления дефектов в виде трещин и прижогов и приводит к формированию остаточного напряжённо-деформированного состояния, негативно сказывающегося на эксплуатационных показателях качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Существует множество путей по снижению температуры в зоне резания при заточке [1-5], воздействующих на различные целевые факторы, среди которых основным и наиболее легко поддающимся воздействию является изменение величины коэффициента трения f в зоне контакта заточного круга с инструментальным материалом.

В металлообработке находит применение диiodид хрома CrI_2 (июпак) [6], который представляет собой красновато-коричневые игольчатые кристаллы, достаточно хорошо

растворимые в воде. Механизм действия диiodида хрома при добавлении как в смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), так и в качестве импрегнатора для абразивных кругов заключается в том, что в условиях интенсивного нагрева в области обработки происходит разложение CrI_2 с формированием слоя йодидов железа FeI_2 , обладающих низким коэффициентом трения [6, 7].

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость в прогнозировании температуры при заточной операции с применением диiodида хрома.

Вывод математической модели

Для вывода математической модели формирования температуры в термодинамической системе «инструмент-заточной круг» в присутствии слоя йодидов железа FeI_2 на поверхности инструмента, в которой будут учитываться теплофизические и трибологические характеристики, используем модель стержневой пары трения. Заточной круг движется вокруг своей оси со скоростью V_k относительно полупространства – инструмента – и прижимается к нему с силой N (рис. 1).

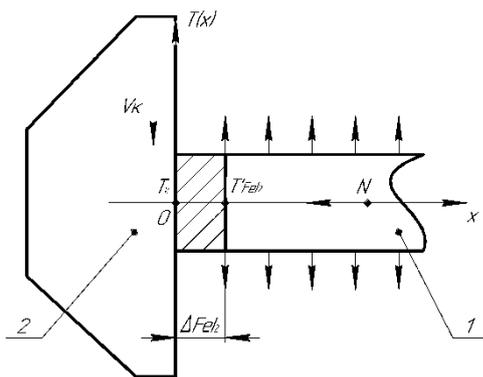


Рис. 1. Модель пары трения со слоем йодидов железа FeI_2 толщиной Δ_{FeI_2} : 1 – инструмент; 2 – чашечный заточный круг

Допустим, что за слоем йодидов железа инструмент обменивается теплом с окружающей средой.

Для зоны $0 \leq x \leq \Delta_{FeI_2}$:

$$\frac{d^2 T_0(x)}{dx^2} = 0, \quad (1)$$

принимаются следующие граничные условия: при $x = 0$:

$$\frac{dT_0(x)}{dx} = \frac{(1-a)q}{\lambda_{FeI_2}},$$

при $x = \Delta_{FeI_2}$:

$$T_0(x) = T_{FeI_2},$$

где λ_{FeI_2} – коэффициент теплопроводности слоя йодидов железа FeI_2 .

Для зоны $\Delta_{FeI_2} \leq x \leq \infty$:

$$\frac{d^2 T_1(x)}{dx^2} - m_1 T_1(x) = 0, \quad (2)$$

граничными условиями являются:

при $x = \infty$:

$$\frac{dT_{FeI_2}(x)}{dx} = 0, \quad \lambda_{FeI_2} \frac{dT_0(x)}{dx} = \lambda_1 \frac{dT_1(x)}{dx},$$

где $m_1 = \sqrt{\frac{a\sigma_1}{\lambda_1 F_1}}$ параметр конвективного теплообмена металлорежущего инструмента со средой; a – коэффициент теплоотдачи в среду; λ_1 – коэффициент теплопроводности основы инструмента; F_1 – площадь теплоотводящей поверхности инструмента; σ_1 – периметр.

Решение уравнений (1) и (2) даёт:

$$T_0(x) = \frac{(1-a)q}{\lambda_{FeI_2}} (\Delta_{FeI_2} - x) + T_{FeI_2},$$

$$T_0(x) = \frac{(1-a)q}{\lambda_{FeI_2}} (\Delta_{FeI_2} - x) + \frac{(1-a)q}{\lambda_1 m_1};$$

$$T_0(x) = (1-a)q \left(\frac{\Delta_{FeI_2} - x}{\lambda_{FeI_2}} + \frac{1}{\lambda_1 m_1} \right); \quad (3)$$

$$T'_0(x) = -\frac{(1-a)q}{\lambda_{FeI_2}}; \quad T'_1(x) = -\frac{(1-a)q}{\lambda_1 m_1}.$$

Из уравнения (3) при $x = 0$ зависимость для расчёта температуры контакта заточного круга с инструментом T_k , примет следующий вид:

$$T_k = (1-a)q \left(\frac{\Delta_{FeI_2}}{\lambda_{FeI_2}} + \frac{1}{\lambda_1 m_1} \right), \quad (4)$$

где $(1-a)$ – доля теплового потока, ушедшего в инструмент со слоем йодидов железа FeI_2 ; a – доля теплового потока, поглощённого заточным кругом; q – плотность теплового потока от сил трения на длине контакта l_k .

Определим параметр $(1-a)$, из уравнения (4), путём решения задачи распространения температуры $T_2(x, \tau)$ в чашечном заточном круге (нестационарная задача).

Дифференциальное уравнение теплопроводности для заточного круга описывается следующей зависимостью [8]:

$$\frac{dT_2(x, \tau)}{dT} = a_2 \frac{d^2 T_2(x, \tau)}{dx^2}, \quad (5)$$

граничные условия имеют вид:

при $x = 0$:

$$\frac{dT_2(x, \tau)}{dT} = -\frac{aq}{\lambda_2};$$

при $x = \infty$:

$$\frac{dT_2(x, \tau)}{dT} = 0,$$

при $\tau = 0$:

$$T_2(x, \tau) = 0;$$

где τ – время; a_2 – коэффициент температуропроводности заточного круга.

В результате решения уравнения (5) с применением преобразования Лапласа получаем [9]:

$$L \left[\frac{dT_2(x, \tau)}{dT} \right] = T'_L(x, s); \quad L(T_2(x, \tau)) = T_L(x, s),$$

где L – оператор Лапласа; s – комплексная переменная.

Так как $T'_L = sT_L(x, s) - T_L(x, 0)$ и $T_L(x, 0) = 0$ (это следует из граничного усло-

вия $T_2(x, \tau) = 0$ при $\tau = 0$), то уравнение (5) в изображениях имеет вид:

$$T_L''(x, s) - \frac{s}{a_2} T_L(x, s) = 0, \quad (6)$$

с граничными условиями:

при $x = 0$:

$$T_L'(x, s) = -\frac{1}{s} \frac{aq}{\lambda_2},$$

при $x = \infty$:

$$T_L'(x, s) = 0,$$

при $\tau = 0$:

$$T_L'(x, s) = 0.$$

Общее решение уравнения (2) имеет вид [9]:

$$T_L(x, s) = Ae^{\sqrt{\frac{s}{a_2}}x} + Be^{-\sqrt{\frac{s}{a_2}}x}, \quad (7)$$

откуда:

$$T_L'(x, s) = \sqrt{\frac{s}{a_2}} Ae^{\sqrt{\frac{s}{a_2}}x} - \sqrt{\frac{s}{a_2}} Be^{-\sqrt{\frac{s}{a_2}}x}. \quad (8)$$

Из формулы (8), применяя граничные условия к уравнению (6), следует, что:

при $x = 0$:

$$x = 0: -\frac{1}{s} \frac{aq}{\lambda_2} = A \sqrt{\frac{s}{a_2}} - B \sqrt{\frac{s}{a_2}},$$

при $x = \infty$:

$$x = \infty: 0 = \sqrt{\frac{s}{a_2}} Ae^{\sqrt{\frac{s}{a_2}}\infty} - \sqrt{\frac{s}{a_2}} Be^{\sqrt{\frac{s}{a_2}}\infty},$$

откуда $A = 0$, $B = \frac{aq\sqrt{a_2}}{\lambda_2 s\sqrt{s}}$.

Тогда формула (6) может быть представлена следующим выражением:

$$T_L(x, s) = \frac{aq\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{s\sqrt{s}} e^{-\sqrt{\frac{s}{a_2}}x}.$$

По таблицам обратных преобразований Лапласа находится оригинал функции (7):

$$T_2(x, \tau) = \frac{aq\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \left[2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} e^{\frac{x^2}{4a_2\tau}} - \frac{x}{a_2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_2\tau}} \right].$$

Откуда при $x = 0$:

$$T_k = T_2(x, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{aq}{\lambda_2} \sqrt{a_2\tau},$$

$$T_k = 1,13 \frac{aq\sqrt{a_2\tau}}{\lambda_2} = \frac{1,13\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} aq. \quad (9)$$

Путём совместного решения уравнений (5) и (9) определим α :

$$(1-a)q \left(\frac{\Delta_{F_{el_2}}}{\lambda_{F_{el_2}}} + \frac{1}{\lambda_1 m_1} \right) = 1,13aq \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}},$$

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta_{F_{el_2}}}{\lambda_{F_{el_2}}} + \frac{1}{\lambda_1 m_1}}{\frac{1,13\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} + \left(\frac{\Delta_{F_{el_2}}}{\lambda_{F_{el_2}}} + \frac{1}{\lambda_1 m_1} \right)}, \quad (10)$$

где время контакта:

$$\tau = \frac{l_k}{v_k}. \quad (11)$$

Длина контакта может быть определена по зависимости, полученной Масловым Е.Н. для случая плоского шлифования торцом круга [10]:

$$l_k = R \cdot \alpha \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{S_{np}}{60 \cdot v_k} \right)^2}, \quad (12)$$

где R – радиус круга; α – угол дуги контакта (рис. 2); v_k – скорость вращения заточного круга; S_{np} – скорость продольной подачи.

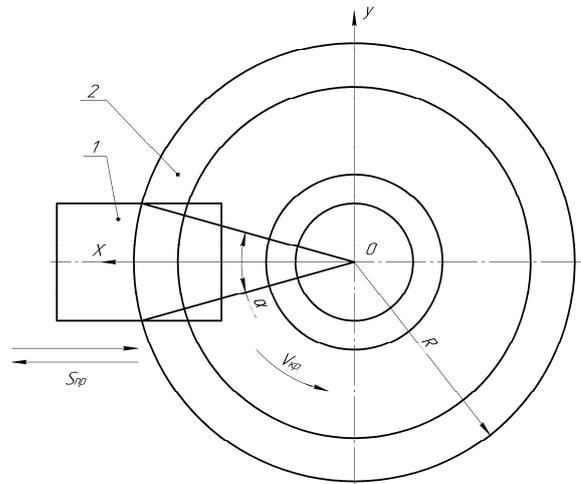


Рис. 2. Схема заточки торцом чашечного круга: 1 – инструмент; 2 – чашечный заточный круг

Для ориентировочных расчётов температуры T_k по формуле (9) допустим, что тепловой поток q формируется только силой трения F и определяется зависимостью [11]:

$$q_F = f p_n v_k, \quad (13)$$

где f – средний коэффициент трения между контактирующими поверхностями инструмента и заточного круга; p_n – нормальное давление на поверхность затачиваемого инструмента; v_k – скорость вращения круга.

Величину нормального давления на затачиваемый инструмент p_n можно представить в виде:

$$p_n = \frac{f_{пл} \cdot N}{t \cdot S}, \quad (14)$$

где $f_{пл}$ – коэффициент трения между поверхностью затачиваемого инструмента с модифицированным слоем, состоящим, например, из плёнки йодида железа FeI_2 [2, 6]; N – сила прижатия инструмента к заточному кругу; t – толщина срезаемого слоя; S – величина подачи.

Учитывая зависимость (14), формула (13) будет иметь вид:

$$q_F = f \cdot \frac{f_{пл} \cdot N}{t \cdot S} \cdot v_k, \quad (15)$$

где f – средний коэффициент трения между обрабатываемым материалом и материалом заточного круга с учётом вероятности неравномерного распределения модифицированного слоя, согласно [12] данный показатель равен 0,6.

Для чашечного заточного круга, наиболее часто используемого при заточке металлорежущих инструментов, скорость v_k может быть найдена по формуле [11]:

$$v_k = \frac{\pi(d_1 + d_2) \cdot n_k}{1,2 \cdot 10^5}, \quad (16)$$

где d_1, d_2 – внешний и внутренний диаметры чашечного заточного круга по его рабочей поверхности, мм; n_k – частота вращения абразивного инструмента, об/мин.

Самостоятельное решение имеет проблема оценки теплового состояния гетерогенных материалах в условиях контактного взаимодействия при трении и резании, прежде всего определение коэффициента теплопроводности λ и теплоёмкости c , входящих в зависимость для определения температуры и коэффициента теплового насыщения материала $\sqrt{\lambda c \rho}$. Известен метод определения коэффициента теплопроводности твёрдых неоднородных тел по известным значениям компонентов, входящих в состав неоднородного тела. Если тело состоит из m -слоёв различной толщины Δ_i и каждый имеет коэффициент теплопроводности λ_i , то эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_{Σ} находится по зависимости, предложенной А.А. Рыжковым [13]:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\sum_i^m \Delta_i}{\sum_i^m \frac{\Delta_i}{\lambda_i}}. \quad (17)$$

Для ориентировочного определения эквивалентного коэффициента теплопроводности λ_{Σ} рекомендуется применять формулу:

$$\lambda_{\Sigma} \approx \lambda_1^{p_1} \lambda_2^{p_2} \dots \lambda_m^{p_m} = \prod_i^m \lambda_i^{p_i}, \quad (18)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности отдельного элемента; p_i – относительная объёмная концентрация элемента ($\sum_i^m p_i = 1$).

Толщину слоя йодидов железа Δ_{FeI_2} , адсорбированных на поверхности металлорежущего инструмента можно оценить с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [14]. При этом в зависимости от химического состава материала поверхностного слоя инструмента и его физико-механических свойств может изменяться соотношение между энергиями адгезии $\mathcal{E}_{адг}$ и когезии $\mathcal{E}_{ког}$, от которого зависит оптимальная толщина слоя йодидов железа [6].

Разработанная математическая модель исследования теплофизических процессов в термодинамической системе «инструмент-заточный круг» была использована для расчёта температур в зоне контакта инструментов из быстрорежущей стали Р18 (например, сверла) и твёрдого сплава Т15К6 (например, режущей пластины резца) с заточным кругом. Были приняты следующие исходные данные при расчёте температуры в зоне контакта:

- для инструментов из быстрорежущей стали Р18 при заточке их абразивным кругом из электрокорунда марки 25А: $\lambda_1 = 24$ (Вт/м·°С); $\lambda_2 = 37$ (Вт/м·°С); $c_2 = 775$ (Дж/кг·°С); $\rho_2 = 3990$ кг/м³; $\Delta_{FeI_2} = 5 \cdot 10^{-6}$ м; $m_1 = 7,9$; $D = 125$ мм; $\alpha = 9^\circ 11'$; $v_k = 13,2$ м/с; $N = 10$ Н; продольная подача стола $S_{пр} = 0,06$ м/с; поперечная подача стола $S_{поп} = 0,02$ мм/дв. ход.

- для инструментов из твёрдого сплава Т15К6 при заточке их кругом из синтетических алмазов АС6: $\lambda_1 = 27,2$ (Вт/м·°С); $\lambda_2 = 30$ (Вт/м·°С); $c_2 = 530$ (Дж/кг·°С); $\rho_2 = 3500$ кг/м³; $\Delta_{FeI_2} = 5 \cdot 10^{-6}$ м; $m_1 = 8,6$; $D = 125$ мм; $\alpha = 5^\circ 30'$; $v_k = 18,5$ м/с; $N = 10$ Н; продольная подача стола $S_{пр} = 0,06$ м/с; поперечная подача стола $S_{поп} = 0,02$ мм/дв. ход.

По формуле (18) было получено ориентировочное значение коэффициента теплопроводности для слоя йодидов железа FeI_2 толщиной $5 \cdot 10^{-6}$ м, коэффициент теплопроводности железа $\lambda_{Fe} = 80,4$ Вт/м·К; йода $\lambda_I = 0,45$ Вт/м·К; процентное соотношение компонентов в соединении $Fe = 18,03\%$; $I = 81,97\%$:

$$\lambda_{FeI_2} \approx 80,4^{18,03\%} \cdot 0,45^{81,97\%} = 1,12 \text{ Дж/м} \cdot \text{К}.$$

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели исследова-

ния теплофизических процессов в зоне контакта системы «инструмент-заточной круг» на универсально-заточном станке мод. 3А64М с использованием метода искусственной термодины «хромель-алюмель» [6] были проведены экспериментальные исследования по определению температур контакта металлорежущих инструментов с соответствующим заточным кругом. Металлорежущие инструменты из быстрорежущей стали были подвергнуты следующим способам заточки:

1 – заточка абразивным кругом без подачи смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС);

2 – заточка абразивным кругом, подвергнутым импрегнированию водным раствором диоксида хрома CrI_2 , без подачи СОТС.

Инструменты из твёрдого сплава Т15К6 (резцы со сменными пластинами) были подвергнуты следующим способам заточки:

1 – алмазным кругом без подачи СОТС;

2 – алмазным кругом с подачей йодсодержащей СОТС.

Результаты теоретических расчётов температуры контакта в системе «инструмент-заточной круг» для инструментов из быстрорежущей стали Р18 представлены в табл. 1, а для инструментов из твёрдого сплава Т15К6 – в табл. 2. Результаты экспериментального определения температуры в зоне контакта инструмента с заточным кругом приведены в табл. 3.

Таблица 1

Результаты расчёта температуры контакта инструмента из быстрорежущей стали Р18 с заточным кругом

$f_{пл}$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$T_k, ^\circ C$	557,04	626,71	696,30	765,93	835,56

Таблица 2

Результаты расчёта температуры контакта инструмента из твёрдого сплава Т15К6 с заточным кругом

$f_{пл}$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$T_k, ^\circ C$	725,20	815,85	906,50	997,15	1087,10

Таблица 3

Результаты экспериментального определения температуры контакта инструментов с заточным кругом

Инструментальный материал	Способ заточки	Температура в зоне контакта, $^\circ C$
Быстрорежущая сталь Р18	1	780
	2	605
Твёрдый сплав Т15К6	1	990
	2	790

Из анализа данных, приведённых в табл. 1-3, видно, что существует достаточно хорошая сходимости результатов теоретических расчётов температур контакта инструментов с соответствующим заточным кругом с результатами экспериментальных исследований (отклонения расчётных данных от экспериментальных не превышает 10 %). Это позволяет использовать разработанную математическую модель для повышения эффективности процесса заточки металлорежущих инструментов за счёт снижения коэффициента трения f в зоне контакта. Так, например, применение йодсодержащих веществ в процессе заточной операции способствует снижению коэффициента трения между металлорежущим инструментом и заточным кругом $f_{пл}$ ориентировочно с 0,6 до 0,4 [6].

Заключение

В результате выполненных аналитических исследований теплофизических процессов в термодинамической системе «инструмент-заточной круг» получена математическая модель, позволяющая определять температуру в зоне контакта инструмента с заточным кругом, которая обеспечивает хорошую сходимости расчётных значений температуры контакта с экспериментальными.

Математическая модель может быть использована как при исследовании теплофизических явлений в зоне резания, так и при разработке и анализе различных технологических решений, направленных на повышение эффективности процессов обработки материалов резанием, в том числе за счёт применения различных присадок в СОТС, импрегнирования абразивных кругов химически-активными веществами, совершенствования способов заточки металлорежущих инструментов.

Литература

1. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2022. 320 с.
2. Эффективные способы заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов / В.И. Бутенко, В.А. Лебедев, Е.Н. Колганова, Р.Г. Кадач // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 11(161). С. 41-48.
3. Крюков С.А. Повышение эффективности и качества шлифования путём совершенствования абразивных инструментов: монография / С.А. Крюков, В.М. Шумячер, Н.В. Байдакова. Волгоград: Издательство ВолгГТУ, 2022. 217 с.

4. Васильев С.Г. Приспособления для затачивания режущего инструмента: учебное пособие / С.Г. Васильев, А.Р. Маслов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 135 с.
5. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2022. 304 с.
6. Бутенко В.И. Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин: монография / В.И. Бутенко; Донской государственный технический университет. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. 242 с.
7. Кадач Р.Г. Применение диоксида хрома для повышения стойкости резцов с режущими пластинами из твёрдого сплава // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2025): материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь, 2025. С. 151-155.
8. Моисеев Д.В. Оценка теплового состояния режущего инструмента в условиях лезвийной обработки резанием: учебное пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. 35 с.
9. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: монография. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 289 с.
10. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М., «Машиностроение», 1974, 320 с.
11. Термодинамические процессы в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента / В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач, С.И. Буймистренко, С.А. Покусаев // Молодой исследователь Дона, 2025, №10(3). С. 70-75.
12. Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Эффективность применения плёнкообразующих материалов в шлифовальных кругах // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 1(49). С. 5-8.
13. Рыжкин А.А., Шучев К.Г. Оценка уровня температурных флуктуаций при контактно-взаимодействии в условиях трения и резания // Трение и износ. 1998. № 6. С. 724-731.
14. Алов Н.В. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа / Н.В. Алов [и др.]; под ред. А.А. Ищенко. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 416 с.

Поступила 28.11.2025; принята к публикации 08.02.2026

Информация об авторах

Бутенко Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Донской государственный технический университет (344003, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), e-mail: butenkowiktor@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9260-1030

Кадач Роман Геннадьевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Донской государственный технический университет (344003, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), e-mail: rkad925@mail.ru

Thermophysical processes in the thermodynamic system «tool-grinding wheel»

V.I. Butenko, R.G. Kadach

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The paper considers the development of a mathematical model for temperature formation in the thermodynamic "tool-grinding wheel" system, taking into account the continuous renewal of iron iodides on the tool surface, formed during the chemical decomposition of chromium diiodide under high-temperature conditions in the machining zone. Chromium diiodide can be used during machining both as an impregnator for the abrasive tool and as an additive to the supplied cutting fluid to reduce the friction coefficient and the thermal stress of the machining process. The sharpening process is accompanied by intense heat generation and leads to the formation of burns and other defects on the surface of the metal-cutting tool, which necessitates the assessment of the temperature during the sharpening operation using chromium diiodide. The mathematical model of the process is based on the rod model of a friction pair. The resulting mathematical model takes into account the geometric parameters of the grinding wheel, sharpening modes and such thermodynamic characteristics of the contacting materials as thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity, and can be applied both to the case of sharpening tools made of high-speed steels and to the case of sharpening carbide plates.

Key words: sharpening; chromium diiodide; iron iodide; cutting temperature; friction coefficient; high-speed steel; hard alloy

References

1. Makarov V.F. "Modern methods of highly efficient abrasive processing of heat-resistant steels and al-loys" ("Sovremennyye metody vysokoeffektivnoy abrazivnoy obrabotki zharoprochnykh staley i splavov"), textbook, St. Petersburg: Lan', 2022, 320 p.
2. Butenko V.I., Lebedev V.A., Kolganova E.N., Kadach R.G. "Effective methods of sharpening metal-cutting tools made of high-speed steels and hard alloys", *Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering (Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2024, no. 11 (161), pp. 41-48.
3. Kryukov S.A., Shumyacher V.M., Baidakova N.V. "Improving the efficiency and quality of grinding by improving abrasive tools" ("Povyshenie effektivnosti i kachestva shlifovaniya putom sovershenstvovaniya abrazivnykh instrumentov"), monograph, VolSTU, 2022, 217 p.

4. Vasiliev S.G., Maslov A.R. “Devices for sharpening cutting tools” (“Prisposobleniya dlya zatachivaniya rezhushchego instrumenta”), textbook, Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 202, 135 p.
5. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. “Theory and practice of increasing the efficiency of grinding materials” (“Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov”), textbook, St. Petersburg: Lan’, 2022, 304 p.
6. Butenko V.I. “Application of iodine and its compounds in the processes of processing and operation of machine parts” (“Primenenie yoda i yego soyedineniy v protsessakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin”), monograph, Rostov-on-Don: DSTU, 2023, 242 p.
7. Kadach R.G. “Application of chromium diiodide to increase the durability of cutters with cutting inserts made of hard alloy”, *Proc. of the IX All-Russian Sci. and Pract. Conf. with Int. Participation: Innovative Technologies in Materials Science and Mechanical Engineering (ITMM-2025)*, Perm, 2025, pp. 151-155.
8. Moiseev D.V. “Assessment of the thermal state of a cutting tool under conditions of blade cutting” (“Otsenka teploвого sostoyaniya rezhushchego instrumenta v usloviyakh lezviynoy obrabotkireza-niyem”), textbook, Don State Technical University, 2023, 35 p.
9. Ryzhkin A.A. “Synergetics of tool material wear during blade processing” (“Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviynoy obrabotke”), monograph, Don State Technical University, 2019, 289 p.
10. Maslov E.N. “Theory of grinding materials” (“Teoriya shlifovaniya materialov”), Moscow: Mashinostroenie, 1974, 320 p.
11. Butenko V.I., Kadach R.G., Buimistrenko S.I., Pokusaev S.A. “Thermodynamic processes in the contact zone of the grinding wheel with the machined surface of the tool”, *Young Researcher of the Don (Molodoy issledovatel' Dona)*, 2025, no. 10 (3), pp. 70-75.
12. Butenko V.I., Gusakova L.V. “Efficiency in application of film-forming materials in abrasive disks”, *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, no. 1 (49), pp. 5-8.
13. Ryzhkin A.A., Shuchev K.G. “Evaluation of the level of temperature fluctuations during contact interaction under friction and cutting conditions”, *Friction and Wear (Treniye i iznos)*, 1998, vol. 6, pp. 724-731.
14. Alov N.V. et al. “Analytical chemistry and physicochemical methods of analysis” (“Analiticheskaya khimiya i fiziko-khimicheskie metody analiza”), Moscow: Akademiya, 2014, 416 p.

Submitted 28.11.2025; revised 08.02.2026

Information about the authors

Viktor I. Butenko, Dr. Sci. (Technical), Professor, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia), e-mail: butenkowiktor@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9260-1030

Roman G. Kadach, postgraduate student, Don Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia), e-mail: rkad925@mail.ru

Ретракция статьи

Редакция журнала уведомляет о ретракции статьи «Использование нейронных сетей для обнаружения ММО и декодирования каналов» (авторы А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова), опубликованной в журнале «Вестник Воронежского государственного технического университета». 2022. Т. 18. № 3. С. 71 – 77.

Ретракция обусловлена обнаружением аналогичной статьи «Deep Learning for Joint MIMO Detection and Channel Decoding» (авторы Taotao Wang, Lihao Zhang and Soung Chang Liew), опубликованной в 2019 году в IEEE 30-м ежегодном международном симпозиуме по персональной, внутренней и мобильной радиосвязи (PIMRC) (Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on).

Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 4 до 10 страниц. Материал статьи следует представить в электронном виде в формате word и pdf.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее – 2,5 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см.

Шрифт текста - Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисуночные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ - 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Над названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка

на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисуночные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. При необходимости допускается ширина рисунка равная двум колонкам. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Перед названием рисунка пишут «Рис. 1». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1».

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: +7(473)278-38-89; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 25.03.2026.
Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 25,3. Уч.-изд. л. 23,4.
Тираж 25 экз. Заказ № 43
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84