

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт"

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблишер"

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблишер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2026

Адрес редакции и издателя

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная,
д. 8, стр. 1, офис 323

e-mail: t-comm@media-publisher.ru

Тел.: +7 (495) 957-77-43

Адрес типографии

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

Индексация журнала:

Ulrich's Periodicals Directory; RSCI; EBSCO; elibrary.ru (ПИНЦ)
Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);
Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;
Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Journal is registered by Federal Service for monitoring compliance with cultural heritage protection law

ISSN 2072-8743 (Online) ISSN 2072-8735 (Print)

Media Registration Certificate

PI No. FS77-55956. Date of issue: November 7, 2013

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of
Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2026

Editorial and Publisher Address

111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str. 8, bloc 1, office 323

e-mail: t-comm@media-publisher.ru.

Tel.: +7 (495) 957-77-43

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



(495) 957-77-43

(926) 218-82-43

info@media-publisher.ru

ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблишер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), *Россия*

Анютин Александр Павлович

(д.ф.-м.н., профессор, член программного и оргкомитетов WSEAS), *Россия, Мексика*

Бестугин Александр Роеальдович

(д.т.н., профессор ГУАП), *Россия*

Вааль Альберт

(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), *Германия*

Варламов Олег Витальевич

(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), *Россия*

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Detecon International GmbH), *Германия*

Гребенников Андрей Викторович

(Sumitomo Electric Europe), *Великобритания*

Данилов Владимир Григорьевич

(д.ф.-м.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), *Россия*

Дулкейтс Эрик

(д.т.н., старший исполнительный директор

корпорации Detecon), *Силиконовая долина, США*

Елизаров Андрей Альбертович

(д.т.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), *Россия*

Ибрагимов Байрам

(д.т.н., профессор Азербайджанского технического

университета, АзТУ), *Азербайджан*

Корбетт Ровэлл

(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), *Гон-Конг (Китай), США*

Кузовкова Татьяна Алексеевна

(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), *Россия*

Лазарева Галина Геннадьевна

(член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор РАН, РУДН), *Россия*

Лернер Илья Михайлович

(д.т.н., КНИТУ-КАИ), *Россия*

Нырклов Анатолий Павлович

(д.т.н., профессор, ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова), *Россия*

Омельянов Георгий Александрович

(д.ф.-м.н., Университет де Сонора, факультет математики, Эрмосильо), *Мексика*

Самойлов Александр Георгиевич

(д.т.н., профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых), *Россия*

Сысоев Николай Николаевич

(д.ф.-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), *Россия*

Чиров Денис Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), *Россия*

Шаврин Сергей Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), *Россия*

Шарп Майкл

(д.э.н., Европейский институт стандартизации – ETSI), *Великобритания*

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), *Россия*

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Фокин Г.А., Тишков А.О.

Экспериментальное исследование точности позиционирования систем GNSS RTK

4

Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Егорычев Р.О.

Оценка изменения дискриминационной характеристики моноимпульсного пеленгатора при совместном приёме когерентной помехи и эхо сигнала

23

СВЯЗЬ

Лебедев И.С., Сухопаров М.Е.

Метод автоматического формирования и выделения объектов наблюдения во временных рядах сетевого трафика в задаче классификации состояния системы

36

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф.

Исследование систем массового обслуживания с фазовыми распределениями

46

ИНФОРМАТИКА

Грачев М.И., Бурлов В.Г., Грачева Н.Г.

Системный подход к автоматизации технологических процессов управления вузом

55

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

СВЯЗЬ

Дмитриева В.В., Кучерявый А.Е.

Метод организации беспроводных каналов нательной сети костюма телеприсутствия с использованием метаповерхностей

63

ТРАНСПОРТ

Смирнов П.И., Валяев О.А., Баурова Н.И.,

Мазлумян Г.С., Субботин Б.С.

Мультимодальная методика интегральной оценки стиля вождения операторов дорожно-строительной техники на основе согласованного применения CAN-данных и телематики

71

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Fokin G.A., Tishkov A.O.
Experimental Study of the Positioning Accuracy of GNSS
RTK Systems 4

Kuznetsov Y.V., Baev A.B., Egorychev R.O.
Effect of Simultaneous Cross-Eye Jamming and Target Echo
on the Monopulse Discrimination Characteristic 23

COMMUNICATIONS

Lebedev I.S., Sukhoparov M.E.
A method for automatic formation and selection of observation
objects in network traffic time series in system state classification
problem 36

Tarasov V.N., Bakhareva N.F.
Study of Queueing Systems with phase Distributions 46

COMPUTER SCIENCE

Grachev M.I., Burlov V.G., Gracheva N.G.
A systems approach to automation of technological processes
in university management 55

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMMUNICATIONS

Dmitrieva V.V., Koucheryavy A.Y.
Wireless Channel Design Method for a Telepresence
Suit Body Area Network Based on Metasurfaces 63

TRANSPORT

**Smirnov P.I., Valyaev O.A., Baurova N.I.,
Mazlumyan G.S., Subbotin B.S.**
Multimodal methodology for integrated driving style assessment
of construction machinery operators based on coordinated use
of CAN data and telematics 71

T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 20. No. 7-2026

Release date: 20.07.2026

The journal is included in the list of scientific
publications, recommended Higher Attestation
Commission Russian Ministry of Education for the
publication of scientific works, which reflect the basic
scientific content of candidate and doctoral theses.

Founder: "Media Publisher", Ltd.

Publisher: Svetlana S. Dymkova
ds@media-publisher.ru

Editor in Chief: Dr. Valery O. Tikhvinskiy

Editorial board

Artem S. Adzhemov
Doctor of sciences, Professor MTUCI, *Russia*

Alexander P. Anyutin
Doctor of sciences, Professor, member of the program
and organizing committee WSEAS, *Russia, Mexico*

Aleksandr R. Bestugin
Doctor of sciences, Professor SUAI, *Russia*

Corbett Rowell
Full Professor: Electronic & Electrical Engineering
Nazarbayev University, *Hong Kong (China), USA*

Denis S. Chirov
Doctor of sciences, MTUCI, *Russia*

Vladimir G. Danilov
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, *Russia*

Eric Dulkeyts
Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, *USA*

Julius Golovachyov
Managing Consultant Detecon International GmbH, *Germany*

Andrey Grebennikov
Ph.D., Sumitomo Electric Europe, *United Kingdom*

Bayram Ibrahimov
Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU),
Azerbaijan

Tatyana A. Kuzovkova
Doctor of sciences, MTUCI, *Russia*

Galina G. Lazareva
Corresponding Member, RAS, Doctor of sciences, Professor RAS,
RUDN, *Russia*

Ilya M. Lerner
Doctor of sciences, KNRTU-KAI, *Russia*

Anatoliy P. Nyrkov
Doctor of sciences, Professor of Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping, *Russia*

Georgii A. Omel'yanov
Doctor of sciences, Universidad de Sonora,
Department of Mathematics, Hermosillo, *Mexico*

Alexander G. Samoilov
Doctor of sciences, VLSU, *Russia*

Michael Sharpe
PhD, European Standards Institute – ETSI, *United Kingdom*

Sergey S. Shavrin
Doctor of sciences, MTUCI, *Russia*

Nikolai N. Sysoev
Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics
of Moscow State University Lomonosov, *Russia*

Oleg V. Varlamov
Doctor of sciences, MTUCI, *Russia*

Albert Waal
Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz
at the Department of Communications Technology, *Germany*

Marina V. Yashina
Doctor of sciences, Professor MTUCI, *Russia*

Andrey A. Yelizarov
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, *Russia*

www.media-publisher.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ GNSS RTK

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-4-22

Manuscript received 15 April 2026;

Accepted 20 June 2026

Фокин Григорий Алексеевич,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург,
Россия, grihafokin@gmail.com, fokin.ga@sut.ru

Тишков Антон Олегович,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург,
Россия, anton.tishkov.2000@mail.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по теме: "Разработка фрагмента модельной гибридной орбитально-наземной сети связи и проведение прикладных научных исследований на её базе", соглашение № 071-03-2026-010.

Ключевые слова: GNSS RTK, NMEA, RINEX, RTCM, PrinCe, RTKLIB, LOS, NLOS, OLOS, позиционирование

Несмотря на существенный прогресс в определении местоположения устройств наземных сотовых сетей 4G LTE, 5G NR и беспроводных локальных сетей WiFi за последние годы сервисы позиционирования сантиметровой точности в реальном времени в федеральном масштабе географической протяженности на сегодняшний день доступны исключительно глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС, GNSS - Global Navigation Satellite System) с системами дифференциальной коррекции (СДК). Наибольшее распространение получили системы GNSS с СДК "кинематика реального времени" RTK (Real Time Kinematic). Программно-аппаратные комплексы (ПАК) GNSS RTK геодезического класса с подпиской на сервисы сети опорных базовых станций привязки помимо качественной аппаратной составляющей приема первичных измерений работают с использованием проприетарного программного обеспечения, реализующего высокоэффективные алгоритмы вторичной постобработки, и позволяют достигать в реальном времени миллиметровой точности оценок координат (ОК). Помимо высокой точности ОК при наличии прямой видимости LOS (Line Of Sight) системы GNSS RTK геодезического класса эффективно компенсируют эффекты многолучевости и в сценариях полного NLOS (Non LOS) или частичного OLOS (Obstructed LOS) отсутствия прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС. Более доступным и массовым устройствам GNSS RTK потребительского сегмента сопоставимая точность недоступна ни в сценариях LOS, ни тем более в условиях NLOS. Актуальной и востребованной на сегодняшний день задачей является повышение точности позиционирования систем GNSS RTK потребительского сегмента за счет постобработки первичных ГНСС измерений в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB. В настоящей работе выполняется экспериментальное исследование точности позиционирования систем GNSS RTK с использованием ПАК геодезического класса PrinCe. Оценки координат получаются как непосредственно из PrinCe, так и в результате постобработки первичных измерений в RTKLIB. Выполняется анализ параметров: среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок координат, количество используемых спутников и геометрический фактор снижения точности. Целью исследования является поиск и обоснование путей повышения точности позиционирования систем GNSS RTK посредством постобработки в RTKLIB при частичном OLOS отсутствии прямой видимости. В результате исследования показано, что предварительная пространственная фильтрация первичных измерений по азимуту и углу места позволяет повысить точность позиционирования по сравнению с постобработкой в RTKLIB по умолчанию. Впервые для сценариев OLOS выполнено сравнение точности ОК, полученных как непосредственно из ПАК геодезического класса, так и в результате постобработки в RTKLIB. Теоретическая значимость заключается в экспериментальном обосновании пространственной фильтрации по азимуту и углу места в сценариях OLOS. Практическая значимость исследования заключается в повышении точности позиционирования систем GNSS RTK потребительского сегмента без использования антенных решёток.

Информация об авторах:

Фокин Григорий Алексеевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0002-5358-1895

Тишков Антон Олегович, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ассистент кафедры беспроводных технологий и систем, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Фокин Г. А., Тишков А. О. Экспериментальное исследование точности позиционирования систем GNSS RTK // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 4-22.

For citation:

G. A. Fokin, A. O. Tishkov, "Experimental Study of the Positioning Accuracy of GNSS RTK Systems," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 7, pp. 4-22. (in Russian)

Введение

Высокоточное определение местоположения (ОМП) является актуальным и востребованным направлением исследований в современных и перспективных гибридных орбитально-наземных сетях радиосвязи и радионавигации [1]. Достижение метровой, дециметровой и сантиметровой точности позиционирования в наземных сотовых сетях 4G LTE [2] и 5G New Radio [3, 4], беспроводных локальных сетях WiFi IEEE 802.11az [5] и перспективных сетях 6G [6, 7] соответственно открывает широкие возможности их практического использования. Однако остается ряд сценариев, включая ОМП транспортных средств [8, 9], где требуется сантиметровая точность оценок координат (ОК) в реальном времени. На сегодняшний день такая точность доступна глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС) [10] с системами дифференциальной коррекции (СДК) [11]. Наибольшее распространение получили системы GNSS (Global Navigation Satellite System) класса «кинематика реального времени» RTK (Real Time Kinematic) [12]. Вторичная обработка ГНСС измерений и поправок СДК [13] в проприетарных комплексах GNSS RTK геодезического класса типа PrinCe [14-16] позволяет достичь сантиметровой точности ОМП. Однако в более доступных устройствах потребительского сегмента [17] такая точность в реальном времени пока недоступна. Для исследования методов и средств повышения точности позиционирования системами GNSS RTK можно воспользоваться открытой библиотекой RTKLIB [18]. В ней используются данные первичных радиотехнических ГНСС измерений в формате RINEX (Receiver Independent Exchange Format) [19], поправки СДК в формате RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) [29], передаваемые через NTRIP-соединение (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) [21], и оценки координат в формате NMEA (National Marine Electronics Association) [22]. Для анализа порядка постобработки первичных измерений и поправок в RTKLIB в настоящей работе выполняется анализ форматов данных, используемых для экспериментального исследования точности позиционирования GNSS RTK.

Сантиметровая точность ОК в реальном времени достигается в известной системе дифференциальной коррекции «кинематика реального времени» RTK [12] за счет использования опорного стационарного навигационного приемника (базы), установленного в точке, координаты которой известны из опорной сети дифференциальных геодезических станций [23]. Выполняя первичные измерения ГНСС и вычисляя оценку своих координат, база сопоставляет их с известными ей истинными координатами [12]. После сопоставления вычисляются отклонения, из чего формируются поправки, которые в реальном времени от базы поступают на мобильный приемник ровер, который использует их для уточнения уже своих координат [13]. На сегодняшний день GNSS RTK остается наиболее распространенным решением достижения сантиметровой точности оценок координат радиотехническими средствами.

Использование программно-аппаратного комплекса геодезического класса PrinCe [14-16] позволяет получать как непосредственные координаты GNSS RTK, так и записывать первичные ГНСС измерения с ровера и поправки с базы для

их последующей постобработки. Постобработка первичных измерений формата RINEX [19] в открытой библиотеке RTKLIB [18] позволяет получить оценки координат, которые можно затем сравнить с таковыми из PrinCe. Получение непосредственных оценок координат из программно-аппаратного комплекса PrinCe и других аналогичных решений геодезического класса отличается высокой точностью, которая обычно недоступна устройствам потребительского сегмента [16]. Алгоритмы постобработки измерений в комплексах геодезического класса обычно недоступны для верификации. В то же время устройства PrinCe [14-16] имеют необходимые программно-аппаратные интерфейсы для записи первичных измерений ГНСС с ровера и поправок с базы в формате RINEX [19]. Дальнейшую постобработку измерений можно реализовать в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB [18]. Использование такого подхода позволяет отслеживать влияние навигационных параметров на точность ОМП.

Известно, что основным фактором снижения точности позиционирования в радиотехнических системах является полное или частичное отсутствие прямой видимости между источниками и приемниками радиосигналов [24-26, 50].

Экспериментальное исследование точности систем GNSS RTK в условиях полного наличия LOS (Line of Sight) и полного отсутствия прямой видимости NLOS (Non LOS) при экранировании металлическим экраном было выполнено в [27]. В настоящей работе исследуется частичное отсутствие прямой видимости при экранировании металлической решеткой OLOS (Obstructed LOS) и при затенении одной стороны приема стеной WLOS (Wall LOS). Для каждого сценария описываются условия эксперимента, приводится оценка координат PrinCe, ОК с постобработкой в RTKLIB, выполняется сравнение решений PrinCe и RTKLIB, после чего формулируются выводы. Опорный сценарий LOS служит эталоном, относительно которого оценивается снижение точности по среднеквадратическому отклонению (СКО) ОК и ряду других параметров: статус решения, количество спутников, значения HDOP, статус RTK-Fix и др.

Целью настоящего исследования является поиск и обоснование путей повышения точности позиционирования системами GNSS RTK в условиях полного NLOS или частичного OLOS отсутствия прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи. В разделе 1 приводится анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK на основе последних публикаций в данной предметной области. В разделе 2 описывается организация эксперимента по исследованию точности позиционирования систем GNSS RTK. В разделах 3 и 4 представлены результаты экспериментальной оценки точности позиционирования систем GNSS RTK на оборудовании геодезического класса PrinCe в сценариях OLOS и WLOS. В разделе 5 показаны пути повышения точности систем GNSS RTK в условиях OLOS и WLOS посредством пространственной фильтрации. Раздел 6 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

1 Анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK

В работе [28] исследуется проблема утраты связи в канале дифференциальных поправок между стационарной базой

станцией и подвижным ровером в системе GNSS RTK, интегрированной с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (ИНС). В такой ИНС инерциальные измерительные модули IMU (Inertial Measurement Unit) образованы микро-электромеханическими системами MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) из гироскопов и акселерометров, которые жестко связаны с подвижным объектом позиционирования. Такие системы называют жестко-связанными ИНС SINS (Strapdown Inertial Navigation System). Для решения проблемы утраты связи в канале поправок предлагается формирование непрерывного вектора вторых разностей радионавигационных параметров фазы за счет использования предыстории дифференциальных поправок от базы вместе с текущими измерениями ГНСС ровера. Результаты имитационного моделирования и эксперимента показали, что в период утраты связи в канале поправок точность оценок координат снижается с сантиметровой до дециметровой. Использование же предложенного подхода обеспечивает стабильность и поддерживает сантиметровую точность оценок координат.

Задача повышения точности ОМП в сценариях работы интегрированных систем SINS/GNSS RTK и позиционирования высокой точности PPP (Precise Point Positioning) посредством усовершенствования расширенного фильтра Калмана (РФК, EKF – Extended Kalman Filter) и разработки итеративного эквивалентного фильтра I-EqF (Iterated Equivalent Filter) решается в работе [29]. Результаты экспериментальной апробации в полевых условиях с устройствами SINS/GNSS потребительского сегмента показали достижение сантиметровой точности, в частности, в сценариях с большим разбросом оценок координат по высоте.

Развитию совместного использования подходов PPP- RTK посвящена работа [30]. Системы GNSS RTK используют первичные измерения фазы несущей ГНСС совместно с поправками от наземных станций СДК в реальном времени. Известным ограничением систем RTK является необходимость наличия и дальность функционирования радиоканала в десятки километров между базой и наземной станцией СДК, а также радиоканала между базой и ровером. Системы PPP лишены этого ограничения и реализуют позиционирование высокой точности посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам видимых спутников ГНСС (ЭВИ – эфемеридно-временная информация) от глобальных источников, расположенных на расстоянии в тысячи километров; также метод PPP отличается от RTK тем, что поправки вносятся в параметры орбит и часов, а не в измерения фаз несущих сигналов ГНСС [31]. Предложенный в [30] подход обработки поправок ЭВИ SSR (State Space Representation) от глобального источника и атмосферных поправок от единственной региональной опорной станции показал сантиметровую и дециметровую точность позиционирования для стационарного и подвижного объекта соответственно.

Исследованию особенностей постобработки первичных измерений ГНСС методом RTK, собранных устройствами потребительского сегмента, посвящена работа [32]. Показано, что целочисленное разрешение неоднозначностей AR (Ambiguity Resolution) фаз несущей радиосигнала при сборе первичных измерений смартфонами затруднено по причине их высокой зашумленности. Предложенный альтернативный метод частичного разрешения фазовых неоднозначностей показал сантиметровую и дециметровую точность оценок

координат в сценарии позиционирования стационарного и подвижного объекта соответственно.

Использование информации о карте объектов для повышения точности позиционирования системами GNSS RTK в сложных городских условиях исследуется в работе [33]. Идея предложенного подхода заключается в возможности прогнозирования условий распространения радиоволн (РРВ) по цифровым 3D картам и классификации наблюдаемых ГНСС приемником спутниковых сигналов на сигналы с наличием LOS и отсутствием NLOS прямой видимости. Недостатком данного подхода для движущегося приемника является сложность пространственной фильтрации сигналов NLOS в режиме реального времени. В [33] развивается концепция карты прогноза источников ошибок приема сигналов ГНСС в текущем участке пространства, задаваемого сеткой азимутов и углов места, для заданной траектории движения приемника. Данная концепция призвана снизить сложность коррекции ошибок, вызванных сигналами NLOS, без необходимости использования инструментов трассировки лучей по цифровым моделям местности. Использование весовых коэффициентов для принятых сигналов ГНСС, являющихся потенциальными источниками ошибок, в РФК показывает достижение дециметровой точности позиционирования в сложных городских условиях.

Техника целочисленного разрешения неоднозначностей IAR (Integer Ambiguity Resolution) фазы несущей, определяющая точность позиционирования в системах GNSS RTK, исследуется в [34]. Для повышения эффективности IAR предлагается интеграция инерциальных навигационных систем INS с одночастотными сигналами ГНСС различных группировок, включая GPS, Galileo, GLONASS, BDS. Суть предлагаемого метода сводится к комплексированию радиотехнических измерений дифференцированных по времени фаз несущей TDCP (Time Differenced Carrier Phase) и вторых разностей фаз несущей DDCP (Double Differenced Carrier Phase) с измерениями инерциальных измерительных модулей IMU; при этом частота взятия первичных радиотехнических и инерциальных измерений составляет 1 и 100 Гц соответственно. Авторы также сообщают о высокой вычислительной эффективности предложенного метода и возможности его реализации в реальном времени на борту позиционируемого объекта. Результаты эксперимента в условиях городской застройки показали дециметровую точность оценок координат.

В работе [35] исследуется позиционирование внутри помещений на основе интеграции методов счисления пути пешехода PDR (Pedestrian Dead Reckoning) и кинематики реального времени RTK. Система GNSS RTK используется для установления и коррекции направления (курса) движения пешехода. Результаты эксперимента с комплексированием измерений GNSS RTK и датчика MEMS IMU показывают дециметровую точность оценок координат и погрешность определения направления движения менее одного градуса.

Использование антенных решеток (АР) с известной геометрией составных элементов в ровере GNSS RTK для повышения точности позиционирования исследуется в работе [36]. Показана целесообразность использования АР линейной конфигурации с числом элементов от трех до шести. Эксперимент с ровером, удаленным от базы на полкилометра и оборудованным тремя антеннами в вершинах правильного треугольника со сторонами в 0,63 м, продемонстрировал

повышение вероятности целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей с оценками координат дециметровой точности с 70 до 90%.

В [37] исследуются возможности вторичной обработки первичных измерений ГНСС в современных смартфонах на операционной системе Android. Такая возможность предусмотрена инициативой компании Гугл по достижению дециметровой точности позиционирования смартфонами GSDC (Google Smartphone Decimeter Challenge) [38]. Для вторичной обработки в [37] используется библиотека с открытым исходным кодом RTKLIB [18]. Результаты постобработки в RTKLIB сравниваются с оценками координат, полученными серийными чипсетами в формате NMEA [19]. Результаты постобработки измерений ГНСС, собранных смартфонами Google Pixel 6, Pixel 9, Xiaomi 14T Pro и Samsung S24, в RTKLIB в режиме DGNS (Differential GNSS) [39], PPK (Post Processing Kinematic) [40] и PPP (Precise Point Positioning) [41] показали метровую точность оценок координат. Показана актуальность проведения подобных исследований для режима GNSS RTK.

В [42] для надежного позиционирования подвижного железнодорожного состава предлагается использовать постобработку навигационных параметров трех сенсоров: приемника GNSS, инерциального модуля IMU и базовой станции поправок RTK. Специфика комплексирования заключается в использовании решений RTK со статусом Float, полученных без целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей. Результаты эксперимента показали достижение метровой точности оценок координат с требуемым доверительным интервалом.

Для компенсации негативных эффектов многолучевого PPB на прием спутниковых сигналов в [43] развивается идея использования пространственной фильтрации сигналов ГНСС посредством антенны с синтезированной апертурой SAA (Synthetic Aperture Antenna). Данный подход реализует адаптивное диаграммообразование на подвижном объекте с заданной периодичностью для формирования максимального коэффициента усиления в направлении на те спутники, которые в текущий момент времени находятся в условиях прямой видимости с ГНСС приемником [44-46]. Результаты имитационного моделирования и натурного эксперимента продемонстрировали повышение точности и стабильности получаемых методом GNSS RTK оценок координат в сценариях городской застройки.

Для компенсации эффектов многолучевости при отсутствии прямой видимости NLOS в условиях плотной городской застройки в [47] исследуется комплексирование измерений RTK с измерениями системы LIO (LiDAR/ Inertial Odometry) из лидара и инерциальной одометрии. Точность позиционирования без целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей, полученная в результате постобработки наборов сырых данных, доступных в открытом доступе, составила единицы метров. Важной особенностью работы являются доступные для верификации программные модули, использованные для сравнения предложенного решения RTK/LIO с решением RTKLIB.

Оценке уязвимости работы систем GNSS RTK к преднамеренным энергетическим помехам и спуфингу с предварительной синхронизацией в адрес базовой станции внесения поправок посвящена работа [48]. Исследование проводится с

использованием открытой библиотеки RTKLIB, на вход которой подаются первичные измерения ровера и поправки RTCM [20] от базовой станции в формате Ntrip [21]. Показана уязвимость координатно-временного обеспечения PNT (Positioning, Navigation, Timing) средствами постобработки в RTKLIB при отсутствии каких-либо мер противодействия. Одним из способов противодействия является получение оценок координат ровером как с поправками от базы, так и без, после чего следует сравнение разброса ОК и вывод о целесообразности исключения поправок из постобработки. Другим способом является предварительная проверка достоверности поправок от базы посредством оценки координат ровера при условии априорного знания его точного местоположения.

Перспективность постобработки первичных фазовых измерений для режима GNSS RTK приемниками геодезического класса и потребительского сегмента была обозначена уже достаточно давно [49] и уже тогда показывала дециметровую точность оценок координат, в том числе, для одностатных приемников.

Проведенный анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK позволяет сделать следующие выводы: 1) основным источником снижения точности является многолучевость при полном или частичном отсутствии прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС в условиях городской застройки; 2) распространенным средством повышения точности остается комплексирование первичных радиотехнических и инерциальных измерений; 3) частные результаты экспериментальной апробации со специализированными алгоритмами обработки показывают, что в сложных условиях приема сигналов ГНСС достигается сантиметровая и дециметровая точность оценок координат для стационарного и подвижного объекта соответственно; 4) авторы работ не выкладывают в свободный доступ программную реализацию предлагаемых в своих исследованиях алгоритмов постобработки, что затрудняет верификацию публикуемых научных результатов; 5) широко распространенным в научном сообществе направлением повышения точности позиционирования является постобработка первичных радиотехнических измерений ГНСС в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB и конфигурацией параметров; 6) перспективным направлением повышения точности позиционирования систем GNSS RTK является пространственная фильтрация сигналов ГНСС с выборочной обработкой тех спутников, которые в текущий момент времени находятся в условиях LOS с приемником и отбрасыванием сигналов тех спутников, которые с высокой вероятностью находятся в условиях полного или частичного отсутствия прямой видимости.

2 Организация эксперимента по исследованию точности позиционирования систем GNSS RTK

Метод RTK основан на использовании опорного навигационного приемника (базы), установленного в точке с точно известными координатами. Этот приемник, получая спутниковые измерения ГНСС, выполняет на их основе ОК, затем вычисляет отклонения от истинных координат и формирует поправки. Данные поправки в реальном времени передаются на мобильный приемник (ровер), который использует их для уточнения своего местоположения. Это позволяет достигать миллиметровой точности.

В рамках исследования была организована следующая схема оценки. В качестве базовой станции использовался приемник PrinCe i30 [14] и контроллер PrinCe HCE620 [15]. Для точного определения координат базовой станции использовалась сеть дифференциальных геодезических станций «Геоспайдер» [23]. Приемник PrinCe i30 изначально был настроен в режим ровера и получал дифференциальные поправки через NTRIP-соединение [21]. Данный протокол позволяет передавать корректирующие данные в формате RTCM [20] от сети геодезических станций [23] в реальном времени через интернет. Поправки RTCM принимались клиентским приложением PrinCe i30 и использовались для высокоточного ОМП согласно рис. 1.

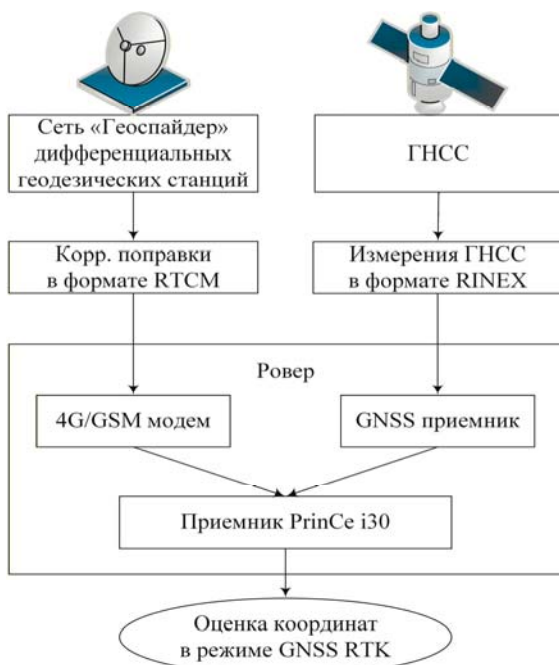


Рис. 1. Схема получения опорных координат базовой станции

После точного определения координат приемника PrinCe i30 он переводился в режим стационарной базовой станции с фиксацией полученной опорной точки. В роли ровера использовался приемник PrinCe i90VR [16], который получал поправки от базы PrinCe i30 [14] по радиоканалу УКВ-диапазона. Для записи оценок координат, полученных в специализированном программном обеспечении (СПО) PrinCe, и сбора ГНСС измерений в формате RINEX [19] и поправок с базы PrinCe i30 в формате RTCM [20] для постобработки в открытой библиотеке RTKLIB к роверу был подключен ноутбук по схеме на рис. 2.

Результаты исследования призваны выявить условия помех, при которых происходит потеря фиксированного решения GNSS RTK, а также сформулировать практические рекомендации по организации измерений и их постобработке в условиях многолучевости при экранировании. Записанные наборы измерений в формате RINEX используются для тестирования приемов пространственной фильтрации сигналов от спутников ГНСС, оказавшихся в условиях естественных и искусственных помех, и призваны выявить, каким образом постобработка способна компенсировать снижение точности, вызванное помехами экранирования.

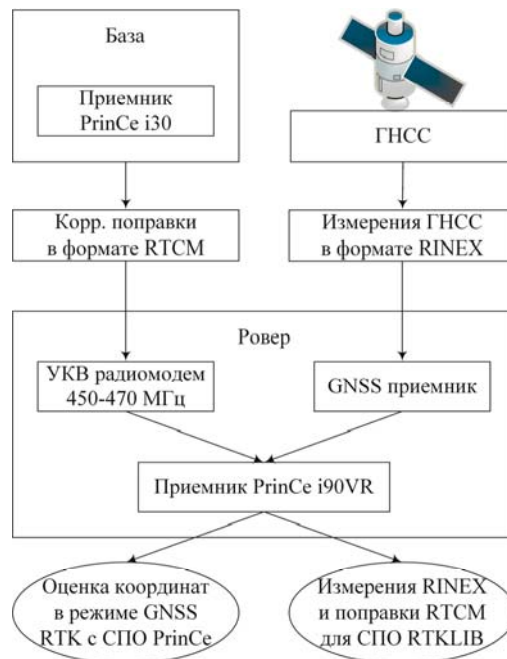


Рис. 2. Схема экспериментальной оценки точности ровера

Для оценки точности позиционирования GNSS RTK в условиях помех в сценариях OLOS, WLOS для сравнения используется опорный сценарий с идеальными условиями прямой видимости LOS между приемником PrinCe i90VR и спутниками ГНСС: измерения ГНСС характеризовались открытым небом, отсутствием строений и преград [27]. В рассматриваемых далее сценариях OLOS и WLOS производится сравнение ОК, полученных напрямую с СПО приёмника PrinCe i90VR, а также рассчитанных в результате постобработки измерений в библиотеке RTKLIB. Для постобработки в RTKLIB записывались первичные измерения от базовой станции (PrinCe i30) и ровера (PrinCe i90VR) в формате RINEX. Для оценки точности были выбраны следующие параметры: СКО оценок координат, полученное с использованием метода скользящего окна, статус решения, количество спутников, горизонтальный фактор снижения точности HDOP. Запись ОК велась во дворе СПбГУТ 10 декабря 2025 года на интервале пять минут.

3 Анализ сценария OLOS

3.1 Условия эксперимента в сценарии OLOS

Сценарий OLOS воспроизводит работу GNSS RTK в условиях интенсивной многолучевости при частичном экранировании приемной антенны ровера металлической решеткой. Рис. 3 иллюстрирует условия проведения эксперимента в сценарии OLOS. Металлическая решётка размещалась параллельно земле на высоте 20 см над антенной приёмника PrinCe i90VR. Такая конфигурация частично перекрывает прямые сигналы, вызывая их рассеяние, дифракцию и формирование многолучевости.



Рис. 3. Условия эксперимента в сценарии OLOS

3.2 Оценка координат PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 4 представлена зависимость СКО ОК по широте и долготе для сценария OLOS: СКО по широте достигает 0,25-0,3 м, тогда как по долготе не превышает 0,1 м.

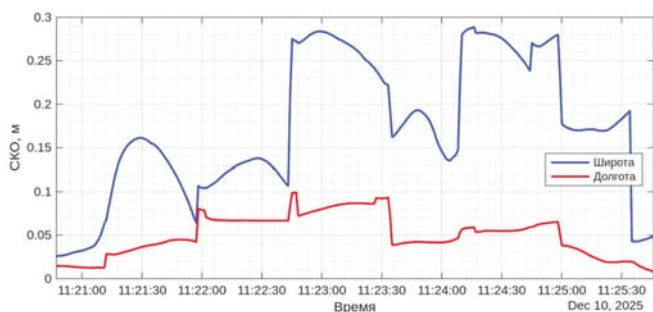


Рис. 4. СКО широты и долготы ОК PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 5 показано изменение высоты относительно времени измерений: периодически возникают скачки до $\pm 8-9$ м. Такие резкие изменения высоты свидетельствуют о нестабильности решения ОК по высоте и совпадают с переходами приёмника в менее точные режимы.

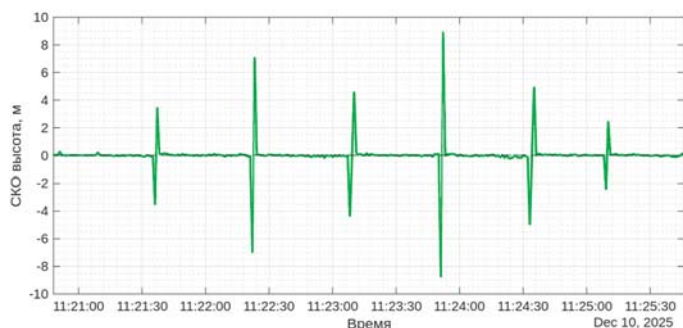


Рис. 5. СКО высоты ОК PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 6 представлена зависимость статуса решения PrinCe по координатам от времени записи: основную часть времени приёмник работал в режиме RTK Fix, обеспечивая наивысшую точность оценок координат; тем не менее периодически фиксируются переходы в режим No Fix, которые сопровождаются появлением выбросов СКО ОК, что свидетельствует о нестабильности фазового разрешения.

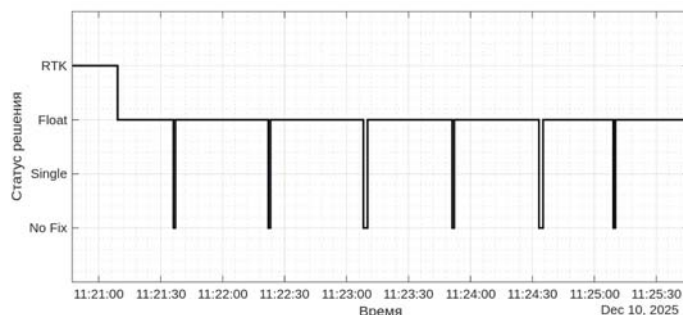


Рис. 6. Статус решения PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 7 показана зависимость количества видимых спутников приёмником PrinCe за время записи; их количество сохраняется на стабильно высоком уровне, составляя в среднем 33, что благоприятно для высокоточного ОМП. Однако наблюдались и кратковременные спады, в ходе которых число видимых спутников снижалось до 24-26.

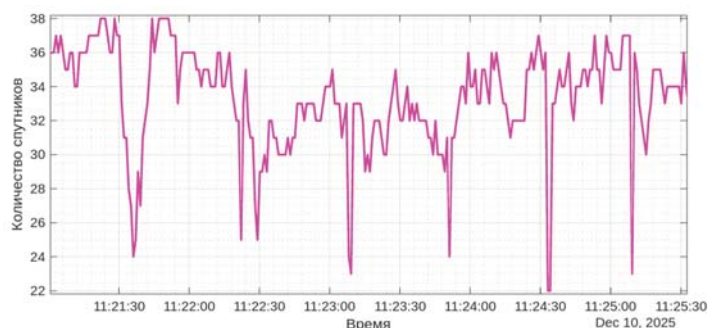


Рис. 7. Количество видимых спутников PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 8 показана зависимость HDOP оценок координат относительно времени. Значения HDOP, в основном, находятся в диапазоне 0,45–0,55, что соответствует хорошей геометрии ГНСС. Отдельные скачки HDOP до 0,7 совпадают по времени с ростом СКО ОК, однако в целом уровень HDOP остаётся низким, что подтверждает благоприятные условия наблюдений, и что даже если сигналы спутников находятся не в прямой видимости, приёмнику PrinCe все равно удастся поддерживать точность на достаточно высоком уровне.

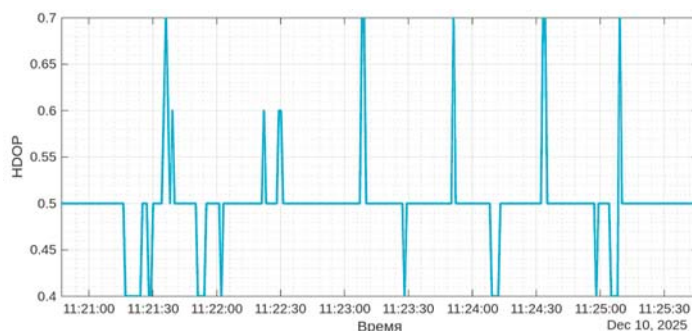


Рис. 8. HDOP ОК PrinCe в сценарии OLOS

Результаты ОК PrinCe в сценарии OLOS демонстрируют снижение точности по сравнению с эталонным сценарием LOS, несмотря на формально благоприятные условия. СКО по широте и долготе измеряется дециметрами; СКО по высоте доходит до 8-9 м.

Наблюдается нестабильность работы приёмника: режим RTK-Fix систематически сменяется состоянием No Fix, что коррелирует с пиками СКО. Количество видимых спутников остается высоким (33), а HDOP сохраняется в диапазоне 0,45–0,55. Однако даже кратковременное снижение числа спутников до 24–26 единиц, сопровождаемые отдельными скачками HDOP до 0,7, приводит к существенным смещениям в ОК.

3.3 Оценка координат RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 9 представлена зависимость СКО ОК по широте, долготе и высоте от времени в сценарии OLOS. СКО показывает резкое снижение в начале интервала, что отражает интервал сходимости постобработки в RTKLIB. После этого СКО стабилизируется на уровне около 0,1–0,2 м по горизонтали и несколько выше по высоте. Несмотря на формально низкие значения СКО, фактические смещения ОК остаются значительными, что указывает на наличие систематической ошибки.

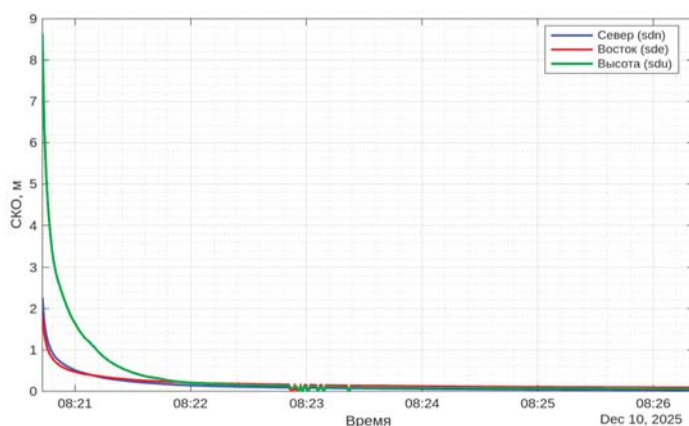


Рис. 9. СКО широты и долготы ОК RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 10 представлена зависимость статуса решения RTKLIB от времени записи. Анализ графика показывает, что решение по ОК преимущественно находилось в режиме Float. Решения RTK-Fix возникают крайне редко и имеют кратковременный характер. Отсутствие устойчивого режима RTK-Fix объясняет значительные ошибки оценок координат.

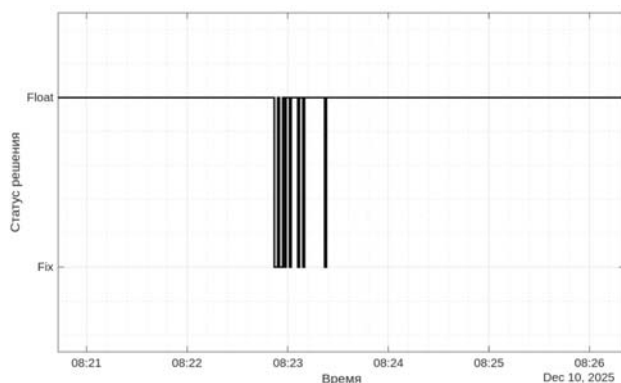


Рис. 10. Статус решения RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 11 показано число спутников, используемых RTKLIB; их число лежит в диапазоне 4–11. В отдельные моменты наблюдается резкое снижение числа спутников, что негативно сказывается на геометрии созвездия ГНСС и приводит к снижению точности ОК.

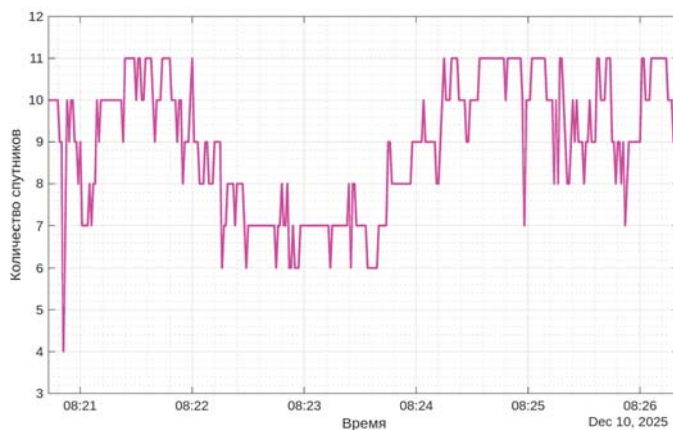


Рис. 11. Количество видимых спутников RTKLIB в сценарии OLOS

Результаты постобработки в RTKLIB в условиях частичного экранирования металлической решеткой в сценарии OLOS демонстрируют снижение возможности восстановления высокоточных оценок координат. Несмотря на стабилизацию СКО на уровне 0,1–0,2 м, ОК содержат значительные систематические смещения; проблемной является высота. Причиной низкой точности является характер режима позиционирования: на протяжении всего интервала постобработки решение практически постоянно находится в режиме Float. Это указывает на неспособность алгоритмов надежно разрешить фазовые неоднозначности в условиях экранирования. Дополнительным фактором выступает недостаточное число спутников. Таким образом, постобработка в RTKLIB не смогла компенсировать влияние частичного экранирования металлической решеткой.

3.4 Сравнение решений PrinCe и RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 12 и 13 показано сравнение смещения ОК PrinCe и RTKLIB по широте и долготе соответственно. Анализ графиков показывает разницу в поведении решений PrinCe и RTKLIB: кривая PrinCe остаётся близкой к нулю на протяжении всего интервала и демонстрирует небольшие колебания в пределах дециметров; решение RTKLIB, напротив, характеризуется отклонениями на несколько метров, а также резкими выбросами в десятки метров.

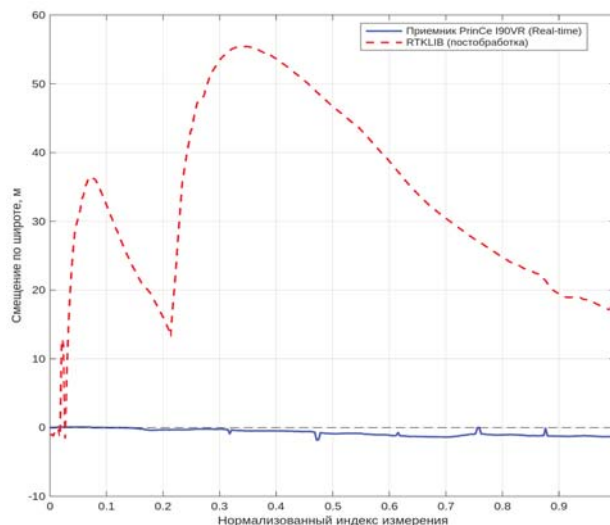


Рис. 12. Сравнение ОК по широте PrinCe и RTKLIB в OLOS

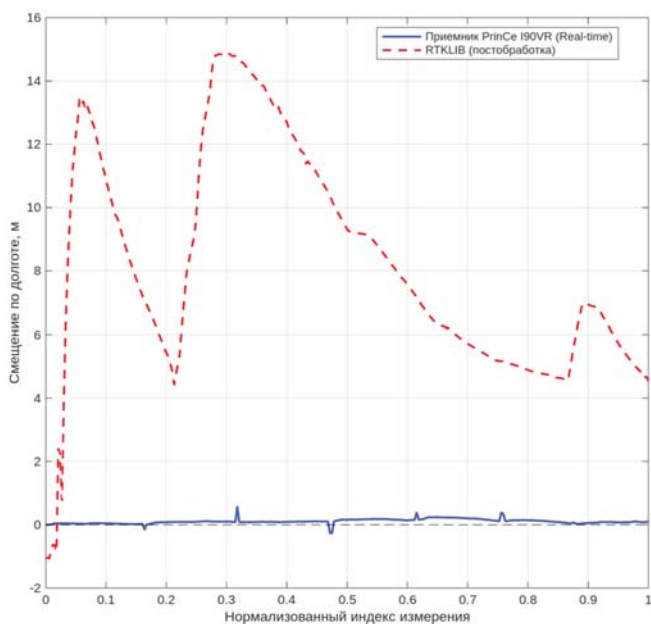


Рис. 13. Сравнение ОК по долготе PrinCe и RTKLIB в OLOS

Сравним ОК PrinCe и RTKLIB на плоскости на рис. 14. Анализ графиков показывает, что ОК PrinCe формируют компактное облако вокруг опорной точки. ОК RTKLIB в постобработке значительно смещены и имеют вытянутую форму, отражающую смещение в десятки метров.

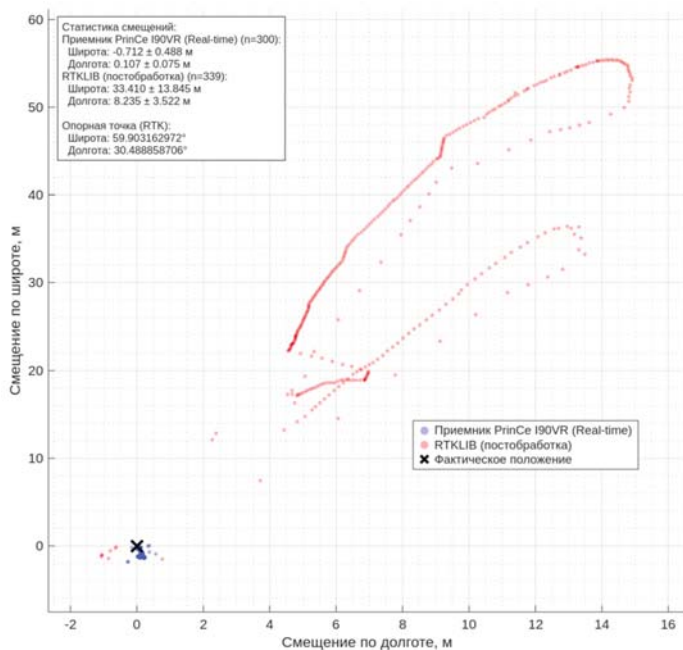


Рис. 14. Сравнение оценок координат PrinCe и RTKLIB в OLOS

3.5 Выводы по сценарию OLOS

Из анализа результатов, полученных приемником PrinCe и путем постобработки в RTKLIB в сценариях OLOS в условиях частичного экранирования, можно сделать вывод о близости ОК PrinCe к эталонной точке и заметном смещении ОК, полученных при постобработке в RTKLIB. Алгоритмы работы устройств геодезического класса PrinCe справляются с обработкой первичных измерений на порядок лучше, чем

работа открытой библиотеки RTKLIB с параметрами по умолчанию. Для повышения точности постобработки в устройствах GNSS RTK потребительского сегмента нужна предварительная пространственная фильтрация спутников, являющихся источником многолучевости.

4 Анализ сценария WLOS

4.1 Условия эксперимента в сценарии WLOS

Сценарий WLOS воспроизводит работу GNSS RTK при частичном отсутствии прямой видимости с затенением одной стороны приема антенны ровера по заданному азимутальному направлению стеной WLOS (Wall LOS). Рис. 15 иллюстрирует условия эксперимента в сценарии WLOS.



Рис. 15. Условия эксперимента в сценарии WLOS

4.2 Оценка координат PrinCe в сценарии WLOS

Из рис. 16 следует, что СКО по широте достигает 0,25 м, тогда как по долготе не превышает 0,15 м.

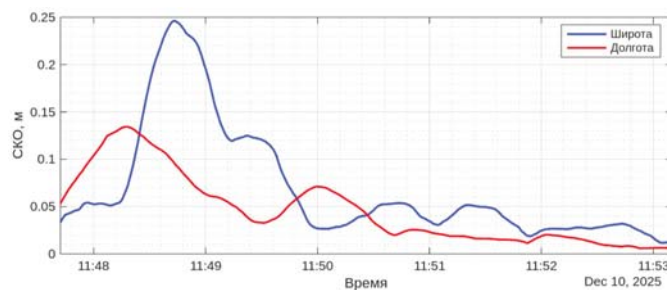


Рис. 16. СКО широты и долготы ОК PrinCe в сценарии WLOS

Из рис. 17 следует, что изменения высоты незначительны, однако присутствует единичный 0,6 м, совпадающий с переходом режима, что типично для RTK-алгоритмов.

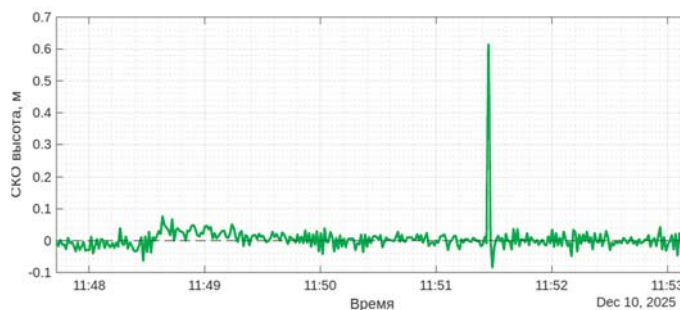


Рис. 17. СКО высоты ОК PrinCe в сценарии WLOS

На рис. 18 представлена зависимость статуса решения PrinCe в сценарии WLOS. Из анализа следует преобладание Float-решений на протяжении большей части наблюдений и появление RTK-фиксации лишь в конце. Это объясняет повышенные ошибки и дрейф ОК в начале эксперимента и подтверждает, что статистика смещений в целом формировалась в режиме Float.

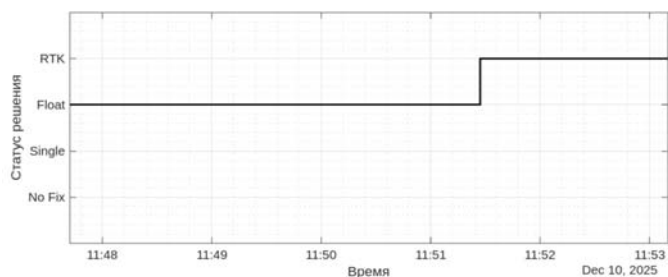


Рис. 18. Статус решения PrinCe в сценарии WLOS

Из рис. 19 следует что значения HDOP в диапазоне 0,6-1,4 характеризуют удачную геометрию созвездия спутников.

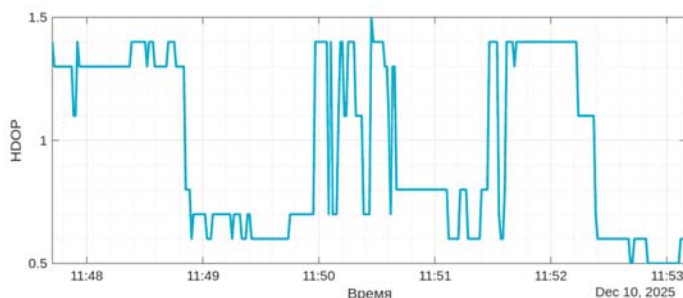


Рис. 19. HDOP ОК PrinCe в сценарии WLOS

Ключевым фактором, определившим качество решения на протяжении большей части эксперимента, является статус позиционирования. Доминирование режима Float объясняет повышенные ошибки и наблюдаемый дрейф координат в начале записи. Появление и закрепление RTK-фиксации лишь к концу интервала измерений напрямую связано с улучшением всех метрик точности. Геометрию спутникового созвездия, оцениваемую через HDOP (0,6-1,4), можно считать удачной. Однако наблюдалась корреляция между всплесками HDOP, уменьшением количества используемых спутников и ростом СКО ОК. Таким образом, даже при отсутствии прямого экранирования, близость крупного отражающего объекта (стена) приводит к многолучевости, которая препятствует быстрой и устойчивой фиксации целочисленных неоднозначностей фазы. Это выражается в длительном пребывании решения в режиме Float и увеличении ошибок на плоскости. Результаты указывают на то, что наличие близко расположенных препятствий является фактором, снижающим надежность высокоточного RTK-позиционирования, даже при сохранении хороших формальных показателей спутниковой геометрии.

4.3 Оценка координат RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 20 представлена зависимость СКО ОК по широте, долготе и высоте от времени в сценарии WLOS. Анализ графиков показывает четкую зависимость точности от времени и условий наблюдений. Стандартное отклонение по широте и высоте находится на уровне 0,25-0,33 м и постепенно

снижается к концу интервала, тогда как СКО по долготе остается существенно ниже и практически неизменным. Это подтверждает, что долгота в данном наборе данных определяется наиболее стабильно, а высота и широта вносят основной вклад в общую погрешность.

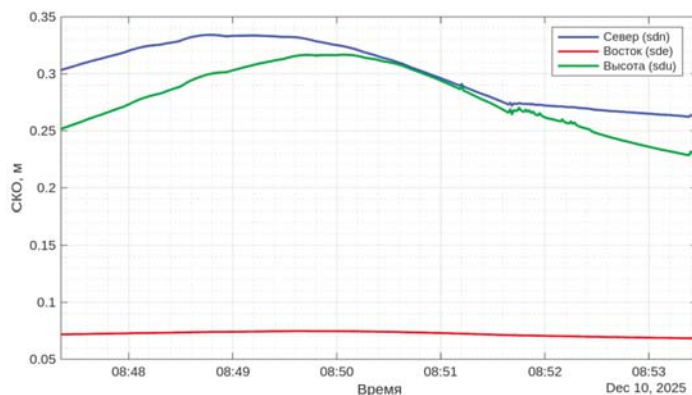


Рис. 20. СКО широты и долготы ОК RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 21 представлена зависимость статуса решения RTKLIB от времени записи. Анализ графика показывает, что на протяжении всего интервала получались Float-решения, что объясняет систематические смещения и высокие СКО.

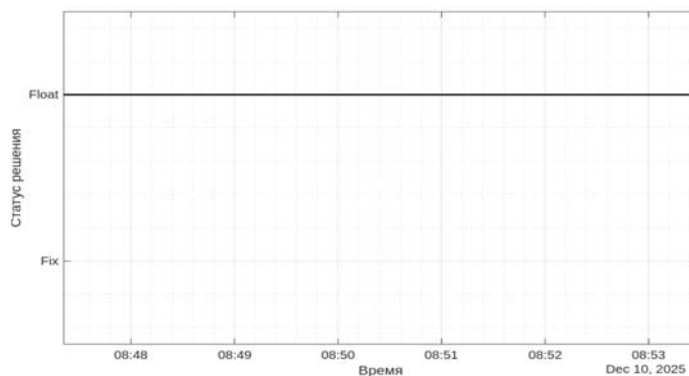


Рис. 21. Статус решения RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 22 показано число спутников, используемых RTKLIB. Анализ графика показывает работу с 8-9 спутниками. Отсутствие значительных скачков указывает на стабильное наблюдение созвездия ГНСС, однако само число спутников невелико, что является одной из причин невозможности получения фиксированного RTK-решения.

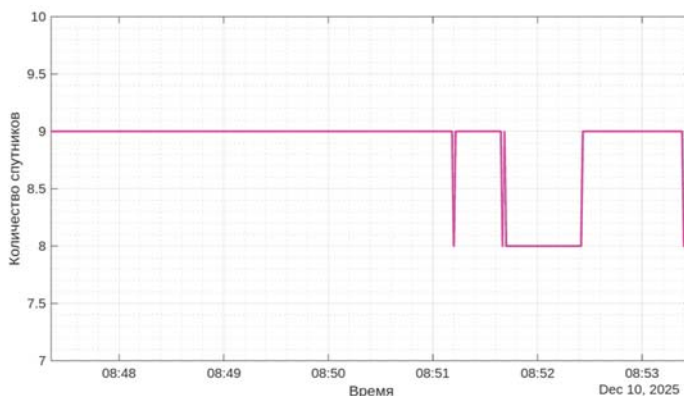


Рис. 22. Количество видимых спутников RTKLIB в сценарии WLOS

Результаты постобработки данных сценария WLOS в RTKLIB демонстрируют значительное снижение точности по сравнению с эталонными условиями. Анализ показывает рост СКО по широте и высоте до 0,25-0,33 м. На протяжении всей обработки сохранялся статус Float, что указывает на неспособность разрешения фазовых неоднозначностей в условиях интенсивной многолучевости, создаваемой близко расположенной стеной. Количество используемых спутников оставалось стабильным, но ограниченным (8-9 шт.), что в сочетании с неблагоприятным влиянием отраженных от стены сигналов препятствовало повышению точности ОК. Таким образом, постобработка в RTKLIB не обеспечила компенсации влияния крупного препятствия.

4.4 Сравнение решений PrinCe и RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 23 и 24 показано сравнение смещения ОК PrinCe и RTKLIB по широте и долготе соответственно.

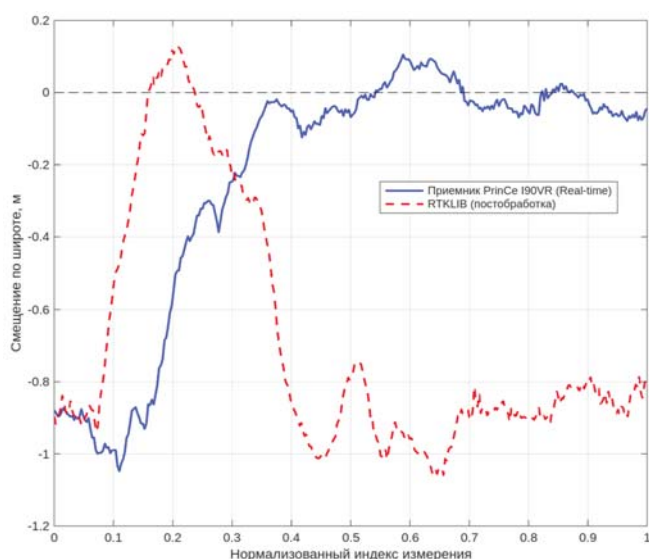


Рис. 23. Сравнение ОК по широте PrinCe и RTKLIB в WLOS

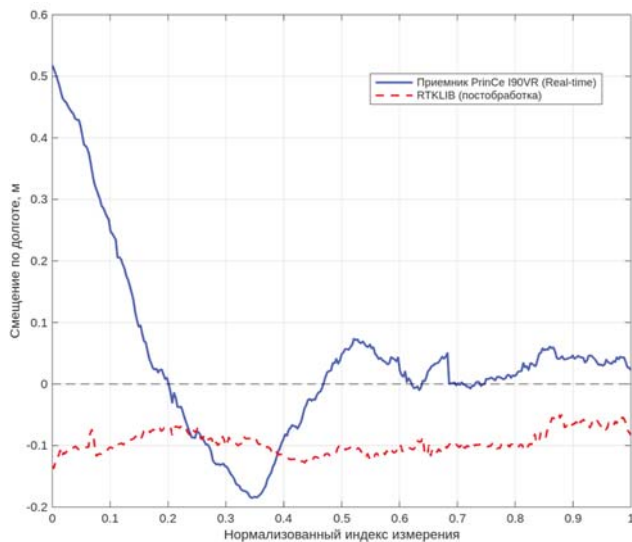


Рис. 24. Сравнение ОК по долготе PrinCe и RTKLIB в WLOS

Для ОК PrinCe наблюдается заметный переходный процесс, после которого смещение стремится к нулю; это указывает на компенсацию систематических ошибок при наличии

достаточного числа спутников. ОК RTKLIB в постобработке демонстрирует более резкие колебания и устойчивое смещение, что свидетельствует о наличии систематической ошибки, сохраняющейся на всем интервале наблюдений. Сравним ОК PrinCe и RTKLIB на плоскости на рис. 25. Анализ показывает, что ОК PrinCe формируют компактное облако вокруг истинного местоположения. ОК RTKLIB смещены от опорной точки и имеют вытянутую форму, отражающую смещение в десятки дециметров.

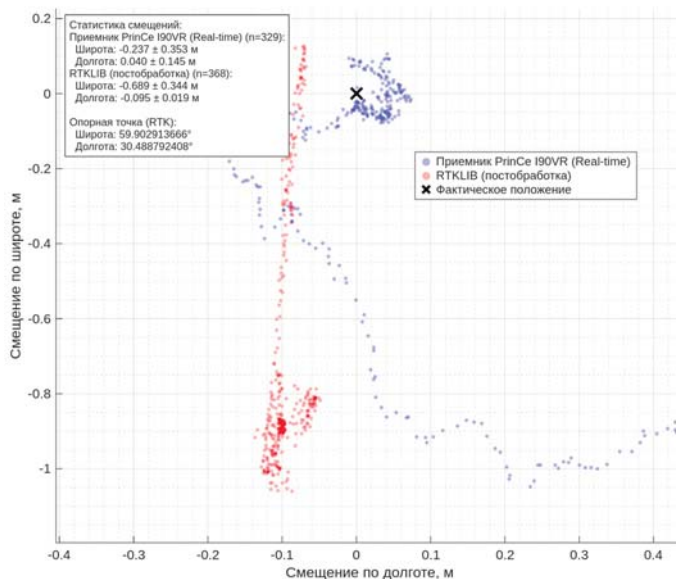


Рис. 25. Сравнение оценок координат PrinCe и RTKLIB в WLOS

4.5 Выводы по сценарию WLOS

На основании проведенного сравнительного анализа работы приёмника PrinCe в реальном времени и постобработки в RTKLIB в условиях открытого неба вблизи стены WLOS сформулированы следующие выводы. Оба метода демонстрируют отклонение от эталонной точности сценария LOS, однако особенности отклонений различны. Решение PrinCe характеризуется выраженным переходным процессом и дрейфом, но с последующей стабилизацией вблизи нулевого смещения. Постобработка в RTKLIB показывает систематически смещённое решение.

Решение PrinCe демонстрирует способность к адаптации и компенсации систематических ошибок, вызванных многолучевостью от близкой стены. После начального переходного периода, связанного со сходимостью, приёмник обеспечивает удержание смещений по широте и долготе вблизи нуля. Это свидетельствует об эффективности встроенных алгоритмов фильтрации, позволяющих нивелировать негативное влияние стационарного бокового отражателя при удачной геометрии спутников.

В отличие от приёмника PrinCe, постобработка в RTKLIB не смогла устранить устойчивое систематическое смещение по обоим горизонтальным координатам. Сохранение нефиксированного решения Float на всём интервале и стабильное отрицательное смещение указывают на то, что стандартные алгоритмы RTKLIB не компенсируют фазовые искажения, вызванные многолучевостью от стены. ОК RTKLIB смещены относительно истинного местоположения, что ограничивает их практическую применимость.

5 Пути повышения точности позиционирования систем GNSS RTK в условиях NLOS и OLOS

5.1 Постановка задачи

Из проведенного экспериментального исследования возможностей позиционирования систем GNSS RTK в сценариях LOS, NLOS [27], OLOS и WLOS можно сделать следующие выводы. В условиях прямой видимости LOS ровером более 30 спутников получается миллиметровая точность оценок координат в режиме RTK-Fix с HDOP=0,5. Полное и частичное экранирование антенны ровера приводит к снижению точности OK до дециметров и метров соответственно со статусом решения Float или DGPS и увеличением HDOP. При этом постобработка в RTKLIB с настройками по умолчанию компенсировать эффекты многолучевости оказалась неспособна.

Для повышения точности оценок координат при постобработке в RTKLIB, по сравнению с проприетарными алгоритмами PrinCe, на входе библиотеки RTKLIB целесообразно использовать предварительную пространственную фильтрацию сигналов ГНСС следующим образом. Первичные измерения от спутников, которые в текущий момент времени находятся в условиях прямой видимости LOS с ровером отправлять непосредственно на вход RTKLIB, а первичные измерения от спутников, которые в текущий момент времени с большой вероятностью, согласно сценарию, находятся в условиях полного или частичного отсутствия прямой видимости NLOS, OLOS и WLOS в постобработке не использовать. Далее рассмотрим выборочную обработку сигналов ГНСС по заданному диапазону углов места, азимутов и совместную пространственную фильтрацию по азимуту и углу места.

5.2 Предложения по пространственной фильтрации по углу места

Ранее было показано, что в сценарии NLOS со сплошным металлическим экраном над антенной ровера наблюдается значительное снижение точности оценок координат RTKLIB при настройках по умолчанию [27]. Для повышения точности рассмотрим пространственную фильтрацию данных RINEX от спутников ГНСС по их углу места с использованием настроек фильтра исходных данных (ИД) RTKLIB на рис. 26.

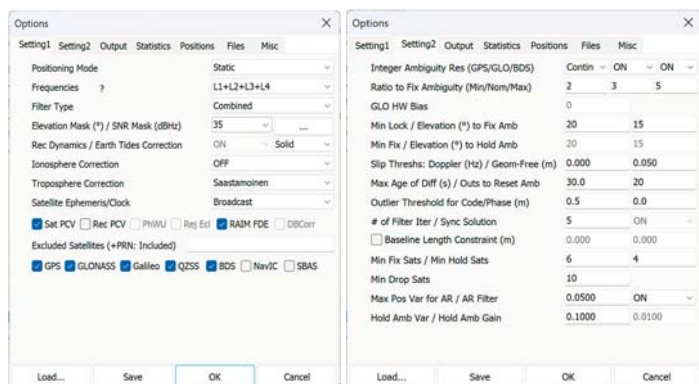


Рис. 26. Настройки фильтров исходных данных в RTKLIB

В сценарии NLOS металлический экран, расположенный непосредственно над приемной антенной [27], приводит к многолучевости сигналов от спутников на средних и высоких углах места. Сигналы спутников с углами места примерно от 45 до 90 градусов приходят после переотражений, что

приводит к смещению псевдодальностных и фазовых измерений. Стандартные настройки RTKLIB ориентированы на отсечение низкоэлевационных спутников с углом места ниже 5-15 градусов, где основными источниками ошибок являются атмосферные эффекты и отражения от земли. Однако в сценарии NLOS низкоэлевационные спутники, чьи сигналы не экранируются, могут оставаться относительно «чистыми». Основной же источник ошибок сосредоточен в области высоких углов, которые традиционно считаются наиболее благоприятными для измерений. RTKLIB не предоставляет возможности задать верхнюю границу маски или, что более важно, исключить определенный диапазон углов места, например, от 45 до 90 градусов. Таким образом, алгоритм вынужден принимать в обработку все измерения от спутников выше установленного нижнего порога, включая те, что наиболее вероятно искажены металлическим экраном.

В данном сценарии использование параметра отношения сигнал/шум (ОСШ) для фильтрации сигналов ГНСС оказывается неэффективным, поскольку экран может не столько ослаблять, сколько переотражать сигнал, оставляя ОСШ высоким. В результате этим ошибочным, но формально «хорошим» по уровню сигнала данным присваивается значительный вес при постобработке, что приводит к смещению оценок координат и ошибочному разрешению целочисленных фазовых неоднозначностей.

Для снижения смещения ОК в сценарии NLOS и OLOS предлагается использовать алгоритм пространственной фильтрации по углу места, представленный на рис. 27.

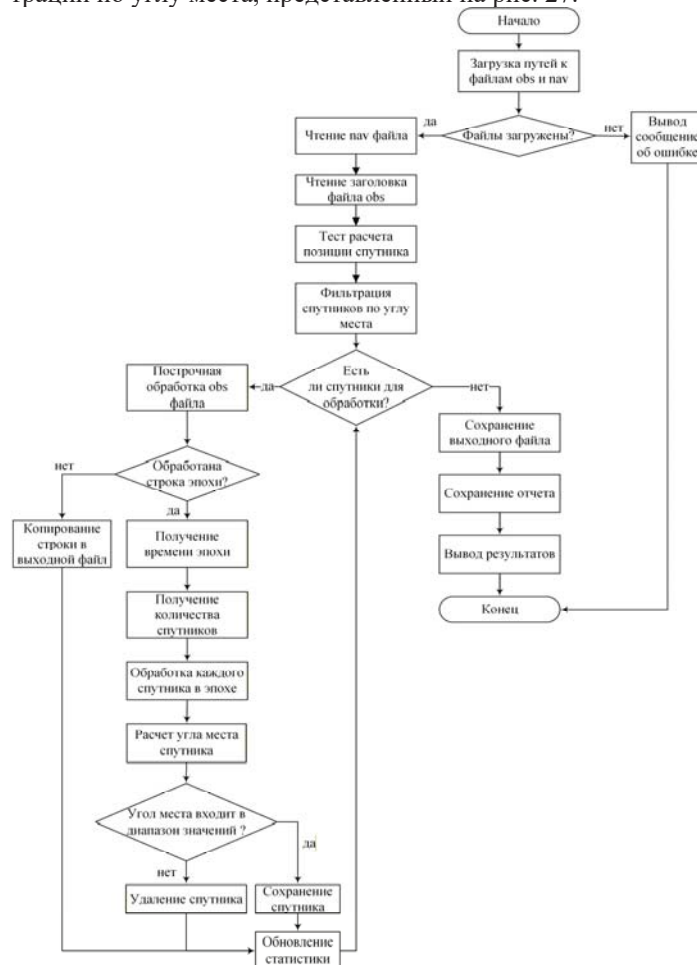


Рис. 27. Алгоритм пространственной фильтрации по углу места

Для постобработки в RTKLIV была реализована программная реализация алгоритма на Python для сигналов GPS. Алгоритм начинает работу с загрузки и проверки существования указанных входных RINEX-файлов: файла наблюдений .obs и файла эфемерид .nav. При успешной проверке инициализируется обработчик, который последовательно обрабатывает эфемеридные данные, а затем считывает заголовок .obs - файла для определения координат приемника. После расчета позиций спутников алгоритм переходит к основному циклу обработки данных. Для каждой эпохи наблюдений извлекается метка времени и список спутников; далее для каждого спутника из эфемерид вычисляются его координаты и угол места относительно приемника.

Спутники, угол места которых не попадает в заданный диапазон, помечаются на удаление из текущей эпохи. Модифицированные данные эпохи записываются в выходной файл, а удаляемые измерения – во вспомогательный отчет. После обработки всех эпох сохраняются итоговые файлы. Функции и математические операции алгоритма фильтрации представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Функции алгоритма фильтрации по углу места

Функция	Назначение	Входные параметры	Выходные параметры	Особенности
datetime_to_gps_seconds(dt)	Преобразование даты в секунды GPS-эпохи	dt: datetime	float (секунды)	Начало отсчета: 1980-01-06
parse_epoch_time(epoch_line)	Поиск строки времени эпохи из RINEX	epoch_line: str	datetime	Обрабатывает секунды с плавающей точкой
calculate_satellite_elevation(sat_ecef, rec_ecef)	Расчет угла места спутника	sat_ecef: [x,y,z], rec_ecef: [x,y,z]	float (градусы)	Прямой геометрический расчет, 0°=горизонт, 90°=зенит
RinexNavParser	Анализатор навигационных файлов RINEX	path: str (путь к файлу)	-	Поддержка RINEX 3.04
sat_pos_broadcast_gps(eph, t)	Расчет позиции спутника GPS	eph: list, t: float	np.array([x,y,z])	Реализация уравнений движения Кеплера
RinexObsProcessor	Процессор наблюдений и фильтрации	obs_path, nav_path: str	-	Основной класс программы
parse_header(self, lines)	Анализ заголовка OBS файла	lines: list	int (индекс конца заголовка)	Извлечение координат приемника
test_satellite_positions(self)	Тестирование расчетов позиций	-	-	Проверка корректности эфемерид
filter_by_elevation(self, max_el, min_el)	Основная фильтрация спутников	max_el, min_el: float	str (путь к файлу)	Удаляет спутники вне диапазона углов
save_elevation_report(self)	Сохранение отчета	-	-	Создание текстового отчета
main()	Главная функция программы	-	-	Главная часть программы

Таблица 2

Операции алгоритма фильтрации по углу места

Функция	Формула	Описание	Операция в программе
Расчет среднего движения	$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ $n = n_0 + \Delta n$	Номинальное и скорректированное движение	sat_pos_broadcast_gps
Уравнение Кеплера	$M_k = M_0 + n \cdot t_k$ $E_k = M_k + e \cdot \sin E_k$	Итеративное решение для эксцентрической аномалии	итерации в sat_pos_broadcast_gps

Истинная аномалия	$\sin v_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k}{1 - e \cdot \cos E_k}$ $\cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1 - e \cdot \cos E_k}$	Преобразование через эксцентрическую аномалию	sat_pos_broadcast_gps
Коррекции орбиты	$\Delta u_k = C_{uk} \cdot \cos 2\varphi_k + C_{us} \cdot \sin 2\varphi_k$ $\Delta r_k = C_{rk} \cdot \cos 2\varphi_k + C_{rs} \cdot \sin 2\varphi_k$	Гармонические поправки	коррекции в sat_pos_broadcast_gps
Угол места	$\theta = 90^\circ - \arccos\left(\frac{r \cdot d}{ r \cdot d }\right)$ $d = \text{sat} - \text{rec}$	Геометрический расчет	calculate_satellite_elevation
Преобразование в ECEF	$x = x' \cdot \cos \Omega - y' \cdot \cos i \cdot \sin \Omega$ $y = x' \cdot \sin \Omega + y' \cdot \cos i \cdot \cos \Omega$ $z = y' \cdot \sin i$	Из орбитальной в земную систему координат	финальный расчет в sat_pos_broadcast_gps

5.3 Предложения по пространственной фильтрации по азимуту

В ряде сценариев пространственная фильтрация исключительно по углу места может оказаться недостаточно эффективной, и тогда нужно рассмотреть пространственную фильтрацию по азимуту. Идея фильтрации по азимуту заключается в исключении из решения навигационной задачи измерений от спутников, направление на которые совпадает с направлением на препятствие в заданном сценарии. Например, при расположении ровера вблизи стены в сценарии WLOS целесообразно исключить из постобработки первичные измерения ГНСС от тех спутников, которые экранируются стороной этой стены по азимуту. Рассмотрим алгоритм пространственной фильтрации на рис. 28.

Реализованный алгоритм позволяет модифицировать файлы наблюдений RINEX, обнуляя отношения сигнал/шум SNR для спутников, попадающих в заданный азимутальный сектор, что исключает использование их измерений в дальнейшей постобработке в RTKLIV. Алгоритм начинает работу с загрузки и проверки существования указанных пользователем входных RINEX-файлов: файла наблюдений .obs и файла навигационных эфемерид .nav.

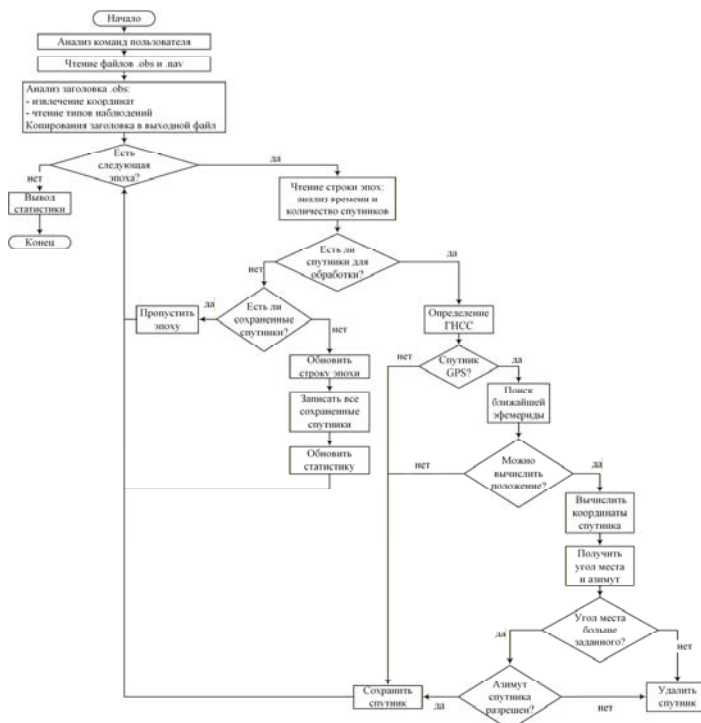


Рис. 28. Алгоритм пространственной фильтрации по азимуту

При успешной проверке инициализируется парсер навигационных данных, который последовательно считывает все эфемериды GPS и сохраняет их в структурированном виде. Затем выполняется чтение заголовка .obs файла для определения типа наблюдений и координат приёмника. После предварительной обработки программа переходит к основному циклу по эпохам наблюдений.

Для каждой эпохи извлекается метка времени, список видимых спутников и соответствующие им измерения. Для каждого спутника системы 'G' на основе эфемерид вычисляются его координаты в глобальной геоцентрической системе ECEF, затем выполняется преобразование в топоцентрическую систему координат ENU относительно приёмника и рассчитываются угол места и азимут.

Спутники, не удовлетворяющие заданным условиям (максимальный угол места, разрешённые или исключённые сектора азимута), помечаются для фильтрации. Вместо полного удаления строк измерений программа модифицирует поля SNR (наблюдения типа «S*») для таких спутников, устанавливая значение 10.001, что служит маркером исключения при последующей обработке в RTKLIB; данное решение обосновано тем, что при неаккуратном изменении файлов наблюдений могут возникнуть ошибки в чтении при оценке координат. При последующей постобработке в RTKLIB активируется штатный фильтр “SNR Mask” с пороговым значением. Поскольку модифицированные спутники имеют SNR ниже порога, они автоматически отбрасываются RTKLIB на этапе загрузки и не участвуют в вычислении координат, что эквивалентно их полному исключению из навигационного решения. Все прочие данные сохраняются без изменений. После обработки всех эпох формируется выходной файл наблюдений с той же структурой, что и исходный, но с изменёнными значениями SNR для отфильтрованных спутников. Также предусмотрена опция формирования отладочного .csv файла с информацией об угле места, азимуте и решении о фильтрации для каждого спутника в каждой эпохе. Функции алгоритма фильтрации по азимуту представлены в таблице 3.

Таблица 3

Функции алгоритма фильтрации по азимуту

Функция	Назначение
RinexNavParser3	Анализ навигационного RINEX-файла (формат 3.04). Извлекает эфемериды GPS и сохраняет их в виде объектов GPSEphemeris.
GPSEphemeris	Класс для хранения параметров эфемерид GPS и вычисления координат спутника методом position_ecef().
RinexObsFilter	Основной класс фильтрации. Содержит методы для анализа заголовка OBS, чтения эпох, расчёта угла места/азимута, модификации SNR и записи результата.
parse_az_spec	Преобразует строковое описание секторов азимута (например, "0-90,180-270") в список интервалов.
ecef_to_geodetic	Преобразует координаты ECEF в геодезические широту, долготу и высоту относительно эллипсоида WGS84.
ecef_to_enu_matrix	Формирует матрицу поворота для перехода от ECEF к топоцентрической системе ENU в точке приёмника.
azel_for_sat	Вычисляет азимут и угол места спутника по его эфемеридам и координатам приёмника.
should_keep	Проверяет, удовлетворяет ли спутник критериям фильтрации (угол места и азимут). Возвращает True/False.
_set_snr_fields	Заменяет значения полей SNR для заданного спутника на 10.001, сохраняя исходное форматирование строк.
filter_and_write	Основной метод, выполняющий фильтрацию всего файла наблюдений и запись результата.
main	Точка входа: обрабатывает аргументы командной строки, инициализирует парсер и фильтр, запускает обработку.

5.4 Проверка пространственной фильтрации по углу места

Рассмотрим пространственную фильтрацию спутников с высокими значениями угла места. Данный подход актуален для рассмотренного ранее сценария NLOS [27] и OLOS. На начальном этапе в расчет не принимаются спутники, находящиеся вблизи зенита, например, в диапазоне от 90 до 85 градусов. Далее порог отсеечения последовательно понижается: сначала исключаются спутники от 90 до 80 градусов, затем от 90 до 75 и так далее, шаг за шагом расширяя «мертвую зону» в верхней полусфере (рис. 29).

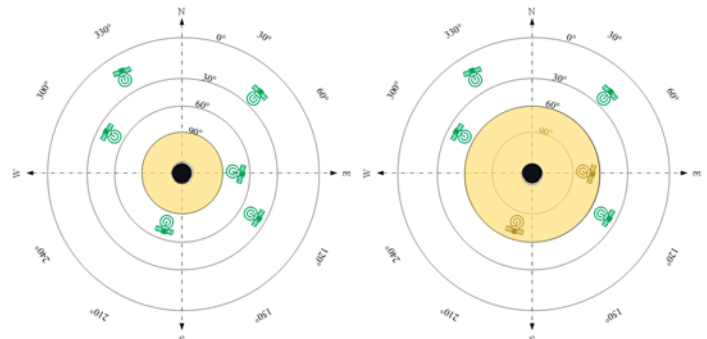


Рис. 29. Порядок пространственной фильтрации по углу места

Для каждой итерации выполняется вычисление ОК из набора измерений оставшихся спутников и рассчитывается СКО. Целью перебора является поиск такого порога отсеечения по углу места, при котором СКО достигает своего минимума. В таблице 4 представлены СКО при итеративном переборе пороговых значений шага по углу места для рассмотренного ранее сценария NLOS.

Указанный в таблице шаг означает верхнюю границу исключаемой зоны: значение “5” соответствует отбрасыванию спутников, находящихся в диапазоне углов места от 90 до 85 градусов, то есть оставляются спутники с углом места менее 85°; значение “10” – от 90 до 80 градусов, и так далее, вплоть до порога “85”, при котором исключаются спутники с углами от 90 до 5 градусов, и в расчете остаются лишь спутники вблизи горизонта.

Таблица 4

СКО при фильтрации по углу места в сценарии NLOS

Шаг °	СКО			
	2D, м	Широта, м	Долгота, м	Высота, м
5	8,799	5,010	1,765	18,933
10	8,799	5,010	1,765	18,933
15	8,799	5,010	1,765	18,933
20	8,801	5,011	1,765	18,933
25	9,383	5,490	1,771	18,967
30	7,976	4,582	1,875	19,580
35	8,558	6,256	2,505	29,482
40	6,122	4,136	1,404	14,434
45	6,585	3,215	2,773	17,524
50	8,335	2,016	4,001	19,234
55	8,165	3,634	3,080	12,018
60	8,165	3,634	3,080	12,018
65	8,165	3,634	3,080	12,018
70	8,165	3,634	3,080	12,018
75	8,186	3,665	3,074	12,125
80	8,046	3,843	2,652	9,460
85	8,046	3,843	2,652	9,460

Анализ результатов позволяет выделить порог в 40 градусов сверху (от 0 до 50°) как наилучший с точки зрения минимизации горизонтальной ошибки. При данном пороге отсеечения (исключение спутников с углами от 90 до 50 градусов и работа с теми, чей угол места ниже 50°) было достигнуто минимальное значение СКО на плоскости 6.122 метра. Интересно отметить, что дальнейшее увеличение исключаемой зоны приводит к нестабильности решения, увеличению HDOP и, как следствие, ухудшению сходимости решения. На рис. 30 представлены ОК RTKLIB для сценария NLOS. Выполнено сравнение исходного решения, и решения после применения пространственной фильтрации по углу места с порогом 40 градусов. После фильтрации разброс оценок координат стал меньше примерно в полтора раза.

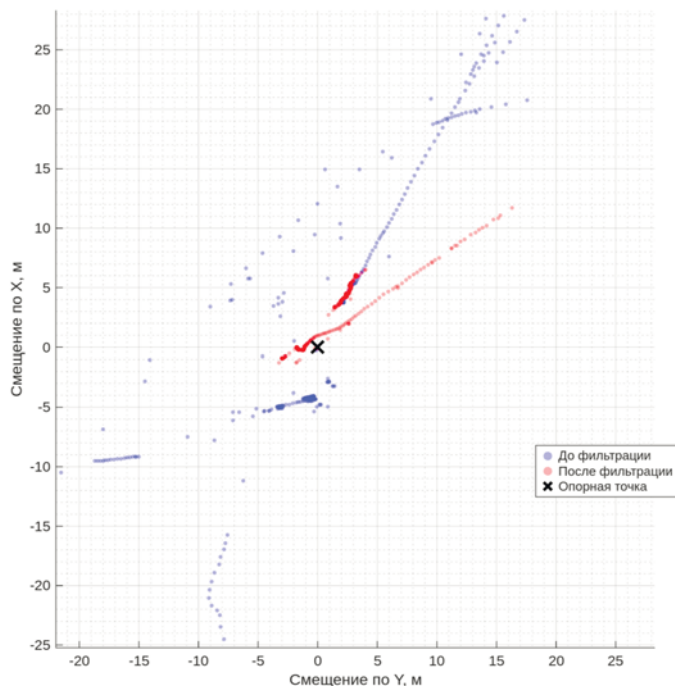


Рис. 30. ОК RTKLIB до и после фильтрации по углу места

5.5 Проверка пространственной фильтрации по азимуту

Аналогичный принцип поиска минимума СКО ОК по набору измерений может быть реализован и для фильтрации по азимуту. Данный подход актуален для сценариев экранирования стеной с одной из сторон WLOS. В предположении, что стена препятствовала приему сигналов ГНСС полностью с одной стороны, использовался метод скользящего сектора в 180°. В отличие от фильтрации по углу места, где исключалась верхняя полусфера, в данном подходе приемник учитывает только те спутники, чьи азимуты попадают в определенный диапазон. Первоначально задается сектор наблюдения 180 градусов, ориентированный от 0 до 180 градусов. Для набора спутников в этом секторе рассчитывается СКО. Затем этот сектор последовательно смещается по азимуту с шагом 10 градусов, охватывая диапазоны 10–190°, 20–200° и т.д. до тех пор, пока сектор не вернется в исходное положение (рис. 31). Для каждого сектора выполняется расчет ОК и СКО. Наиболее удачной считается такая ориентация азимутального сектора, которая обеспечивает наименьшее СКО.

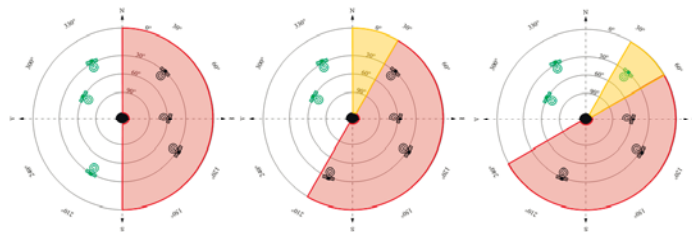


Рис. 31. Порядок пространственной фильтрации по азимуту

Для исследования пространственной фильтрации по азимуту использовался набор измерений из сценария WLOS. В таблице 5 представлены СКО при итеративном переборе пороговых значений шага по азимуту. Для каждой пары границ сектора (нижняя и верхняя) приведены значения СКО.

Таблица 5

СКО при фильтрации по азимуту в сценарии WLOS

Нижняя граница °	Нижняя граница °	СКО			
		2D, м	Широта, м	Долгота, м	Высота, м
0	180	6,211	1,826	0,283	3,410
10	190	6,211	1,826	0,283	3,410
20	200	6,211	1,826	0,283	3,410
30	210	6,211	1,826	0,283	3,410
40	220	6,211	1,826	0,283	3,410
50	230	6,211	1,826	0,283	3,410
60	240	6,211	1,826	0,283	3,410
70	250	6,211	1,826	0,283	3,410
80	260	6,211	1,826	0,283	3,410
90	270	6,211	1,826	0,283	3,410
100	280	5,312	0,599	0,065	1,640
110	290	5,048	1,089	0,189	2,230
120	300	4,834	0,436	0,189	1,039
130	310	4,834	0,436	0,189	1,039
140	320	4,834	0,436	0,189	1,039
150	330	4,834	0,436	0,189	1,039
160	340	4,834	0,436	0,189	1,039
170	350	4,834	0,436	0,189	1,039
180	0	4,834	0,436	0,189	1,039
190	10	4,834	0,436	0,189	1,039
200	20	4,834	0,436	0,189	1,039
210	30	4,834	0,436	0,189	1,039
220	40	4,834	0,436	0,189	1,039
230	50	4,834	0,436	0,189	1,039
240	60	4,834	0,436	0,189	1,039
250	70	4,834	0,436	0,189	1,039
260	80	4,834	0,436	0,189	1,039
270	90	4,834	0,436	0,189	1,039
280	100	6,564	0,967	0,165	1,654
290	110	5,629	1,428	0,163	1,709
300	120	6,211	1,826	0,283	3,410
310	130	6,211	1,826	0,283	3,410
320	140	6,211	1,826	0,283	3,410
330	150	6,211	1,826	0,283	3,410
340	160	6,211	1,826	0,283	3,410
350	170	6,211	1,826	0,283	3,410

Найденный в ходе калибровки азимутальный сектор сохраняет эффективность в течение ограниченного интервала времени, пока геометрия созвездия не претерпевает изменений. Для продолжительных сценариев может потребоваться периодическое обновление маски, что может быть реализовано путем повторения процедуры калибровки в фоновом режиме без прерывания основного потока позиционирования. Анализ данных в таблице 16 позволяет выделить несколько характерных зон. Первые десять положений сектора (от 0-180 до 90-270, выделены желтым) демонстрируют высокую горизонтальную ошибку на уровне 6,211 метра, что говорит о неудачном направлении приема.

Начиная с сектора 100-280 градусов наблюдается улучшение точности: горизонтальное СКО снижается до 5,312 метра. Наилучший результат достигается при установке сектора в диапазоне от 120 до 300 градусов, где СКО в 2D падает до минимального значения 4,834 метра. Отметим, что данное решение не является единственным: сектора с границами 120-300, 130-310 и до 270-90 (выделено зеленым) также образуют набор удачных направлений приема. Остальные направления можно считать экранированными стеной. На рис. 32 представлены ОК RTKLIV для сценария WLOS. Выполнено сравнение исходного решения, и решения после пространственной фильтрации по азимуту с исключением направления на стену. После фильтрации разброс оценок координат стал меньше примерно в полтора раза.

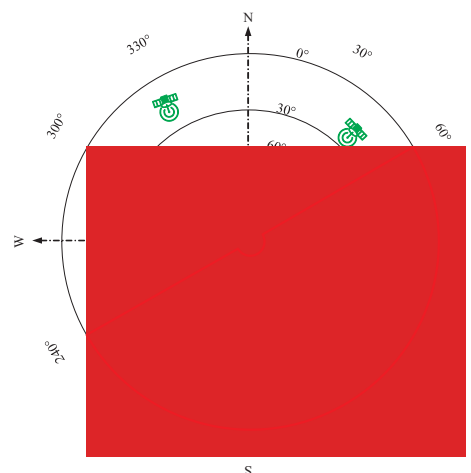


Рис. 33. Порядок совместной пространственной фильтрации

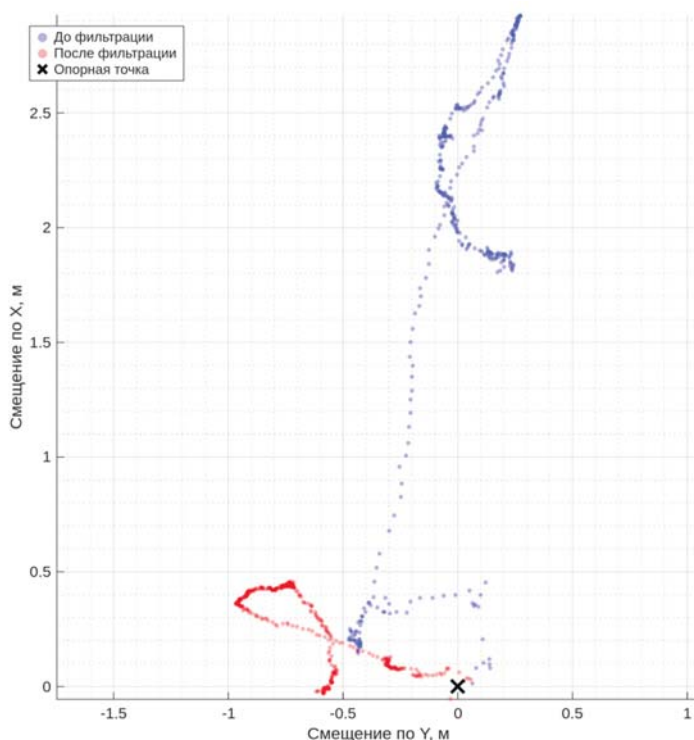


Рис. 32. ОК RTKLIV до и после фильтрации по азимуту

5.6 Предложения по совместной пространственной фильтрации по азимуту и углу места

В основе совместной пространственной лежит анализ заранее собранного массива измерений ГНСС в формате RINEX с итеративным исключением спутников по критерию заданного азимута и угла места. Описанные выше подходы могут быть реализованы совместно. Совместная пространственная фильтрация по азимуту и углу места предполагает последовательное или одновременное применение ограничений как по углу места, так и по азимуту. Например, можно сначала исключить спутники с высоким углом места, а затем, среди оставшихся, искать наиболее удачный азимутальный сектор, или же перебирать все возможные комбинации обоих параметров. Однако такая совместная фильтрация нетривиальна с вычислительной точки зрения. На рис. 33 представлен пример совместной работы с фильтрацией и по углу места, и по азимуту.

6 Выводы

В результате экспериментального исследования точности позиционирования систем GNSS RTK для сценариев LOS, NLOS в [27] и OLOS, WLOS выполнено сравнение точности оценок координат, полученных как непосредственно из программно-аппаратного комплекса геодезического класса, так и в результате постобработки первичных измерений ГНСС в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIV. Показано, что предварительная пространственная фильтрация первичных измерений по азимуту и углу места позволяет примерно в полтора раза повысить точность позиционирования по сравнению с постобработкой RTKLIV по умолчанию. Экспериментально обоснованный подход пространственной фильтрации по азимуту и углу места в сценариях NLOS, OLOS и WLOS может быть реализован в устройствах GNSS RTK потребительского сегмента без использования антенных решеток для кратного повышения точности позиционирования. Предложенный подход пространственной фильтрации измерений по азимуту и углу места может быть реализован программно на внешнем вычислителе (смартфоне, планшете), сопряженном с RTK-ровером, и требует лишь короткого (2-3 минуты) этапа начальной калибровки для определения оптимальной маски под текущее созвездие спутников. После одной настройки фильтра обработка координат производится в реальном времени с использованием стандартных RTK алгоритмов. Важно подчеркнуть, что предложенный подход не требует изменения аппаратной части потребительских GNSS RTK-приёмников. В типовой архитектуре современных RTK-систем, где первичные измерения передаются на внешнее вычислительное устройство (смартфон, планшет) для обработки, реализация пространственной фильтрации сводится к добавлению программного модуля предварительной селекции спутников. Кратковременный этап калибровки (2-3 минуты) в начале сеанса ОМП позволяет определить наиболее удачную для текущего сценария измерений и созвездия ГНСС конфигурацию фильтра, после чего позиционирование осуществляется в реальном времени с повышенной (по сравнению с настройками по умолчанию) точностью. Таким образом, метод сохраняет все преимущества режима RTK и может быть интегрирован в существующие программные комплексы без существенного увеличения времени подготовки к измерениям.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по теме: «Разработка фрагмента модельной гибридной орбитально-наземной сети связи и проведение прикладных научных исследований на её базе», соглашение № 071-03-2026-010.

Литература

1. Kassas Z. Z. M., Maaref M., Morales J. J., Khalife J. J., Shamei K. Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2020. Vol. 12. № 3. P. 36-52.
2. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б., Харин В.Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 28-47.
3. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48-63.
4. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80-99.
5. Фокин Г.А., Багаев Е.С., Мецерыков Д.Е. Позиционирование в беспроводных локальных сетях Wi-Fi стандарта IEEE 802.11az. Часть 1. Постановка задачи достижения дециметровой точности // Первая миля. 2025. № 1 (125). С. 50-56.
6. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемо-передатчиков в системах когнитивного радио 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №6. С. 4-20.
7. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемо-передатчиков 6G в ближней зоне // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №8. С. 4-20.
8. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 45-59.
9. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств с комплексированием дальнометрических, угломерных и инерциальных измерений в расширенном фильтре Калмана // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 51-67.
10. Фокин Г.А., Мецерыков Д.Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса PrinCe для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 3 (37). С. 77-95.
11. Grewal M. S., Andrews A. P., Bartone C. G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 4th ed. Wiley, 2020. 608 p.
12. Real Time Kinematics. NAVIPEDIA [Электронный ресурс]. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics (Дата обращения 06.04.2026).
13. Odolinski R., Teunissen, P.J. Low-cost, high-precision, single-frequency GPS-BDS RTK positioning // GPS solutions. 2017. Vol. 21. № 3. P. 1315-1330.
14. Приемник PrinCe i30. // АО «ПРИН». [Электронный ресурс]. URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i30vr/ (Дата обращения 06.04.2026).
15. Контроллер PrinCe HCE620. // АО «ПРИН». [Электронный ресурс]. URL: https://prin.ru/kontrollery/prince/kontroller_prince_hce600/ (Дата обращения 06.04.2026).
16. Приемник PrinCe i90VR. [Электронный ресурс] // АО «ПРИН». URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/ (Дата обращения 06.04.2026).
17. SparkFun RTK Surveying Kit // SparkFun Electronics. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-rtk-surveying-kit.html> (Дата обращения 06.04.2026).
18. RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning // Tomoji Takasu. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB> (Дата обращения 06.04.2026).
19. RINEX // [Электронный ресурс]. URL: <https://igs.org/wg/rinex/> (Дата обращения 06.04.2026).
20. Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rtcn.org/> (Дата обращения 06.04.2026).
21. Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol // Federal Agency for Cartography and Geodesy. [Электронный ресурс]. URL: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/> (Дата обращения 06.04.2026).
22. NMEA Manual // SparkFun Electronics. [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/3/2/f/a/NMEA_Reference_Manual-Rev2.1-Dec07.pdf (Дата обращения 06.04.2026).
23. Геоспайдер // ООО «НПП «ГЕОМАТИК». [Электронный ресурс]. URL: <https://geospider.ru/> (Дата обращения 06.04.2026).
24. Фокин Г. А. Позиционирование в условиях отсутствия прямой видимости с использованием цифровых моделей местности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 11. С. 4-13.
25. Фокин Г. А., Аль-Одхари А. Х. Обработка РДМ измерений для позиционирования с использованием беспилотных летательных аппаратов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 7. С. 52-58.
26. Хыя Х. К., Фокин Г. А. Комплексное исследование точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях отсутствия прямой видимости // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №8. С. 13-28.
27. Meshcheryakov D., Fokin G. Experimental Study of GNSS RTK Accuracy in LOS and NLOS Scenario // 2026 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 10-12 March. 2026. P. 1-6
28. Bian Y., Cao S., Wang G., Qin X., Hu M., Qin H. A Stable RTK/MEMS-IMU Tightly-Coupled Algorithm Under Differential Corrections Outage // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2025. Vol. 74. № 8. P. 12895-12906.
29. Lu W., Luo Y., Guo C., Jiang W. An Iterated Equivariant Filter and Its Application in Tightly Coupled SINS/GNSS Integrated Navigation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. Vol. 74. P. 1-14. Art no. 9518314.
30. Yang Y.-S., Jan S.-S. Enhanced Single Station PPP-RTK using CNES SSR Correction // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 481-485.
31. Wang R., Blanch J., Walter T. Overbounding Time-correlated Errors for a Multi-constellation Precise Point Positioning Integrity Service // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 235-243.
32. Hu J., Li P., Feng J., Zhou F., Yi D., Bisnath S. Enhancing Smartphone Relative Positioning With Partial Wide-Lane Ambiguity Resolution: Path to Real-Time, Decimeter-Level Positioning in User Environments // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. № 3. P. 3177-3187.
33. Ruwisch F., Schön S. Feature Map Aided Robust High Precision GNSS Positioning in Harsh Urban Environments // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. Vol. 26. № 9. P. 13721-13733.
34. Chen C., Ge Y., Zhao X., Hu C., Yang X., Yu X. Improving Single-Frequency Multi-GNSS RTK/INS Tightly Coupled Integration by Mixing Time-Differenced and Double-Differenced Carrier Phase for Vehicle-Borne Positioning // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. № 6. P. 6696-6707.
35. Huang J. et al. Pedestrian Navigation Using Waist-Mounted IMU and RTK // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25. № 3. P. 5510-5519.
36. Liu X., Ballal T., Al-Naffouri T.Y. Performance Analysis of

Antenna Array-Aided RTK Positioning // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025. Vol. 61. № 2. P. 5325-5336.

37. Chun J. *et al.* Performance Evaluation of the Latest Smartphones and Smartwatch Using GNSS Raw Measurements // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 1527-1535.

38. Smartphone Decimeter Challenge. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm> (Дата обращения 06.04.2026).

39. Differential GNSS. [Электронный ресурс]. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS (Дата обращения 06.04.2026).

40. PPK – Post Processing Kinematic. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sbg-systems.com/glossary/ppk-post-processing-kinematic/> (Дата обращения 06.04.2026).

41. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sbg-systems.com/technology/ambiguity-resolution-in-precise-point-positioning/> (Дата обращения 06.04.2026).

42. Grosch A., Crespillo O.G. Robust Railway Ground Truth and Confidence Bounds Estimation based on RTK/INS Forward-Backward Smoothing // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 1336-1347.

43. Dampf J., Bochkathi M., Pany T. RTK performance of synthetic aperture processing on top of the ULB-PLL method with real-world urban GPS/Galileo L1/L5 signals // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April -

01 May. 2025. P. 1226-1238.

44. Фокин Г. А. Особенности функционирования территориально-распределенных самоорганизующихся сетей радиосвязи с адаптивными антенными системами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. Том 3. №1. С. 20-22.

45. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Модели пространственной селекции при диаграммообразовании на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. Т. 16. № 1. С. 195-216.

46. Степанец И.В., Фокин Г.А., Мюллер А. Способы оценки пропускной способности систем massive MIMO // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 64-69

47. Wang R. *et al.* RTK-LIO: Tightly Coupled RTK/LiDAR/Inertial Navigation System Based on Optimization Approach // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25. № 13. P. 26220-26227.

48. Spanghero M., Papadimitratos P. UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 316-327.

49. Cai Y., Cheng P., Meng X., Tang W., Shi C. Using network RTK corrections and low-cost GPS receiver for precise mass market positioning and navigation applications // 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, Germany, 05-09 June. 2011. P. 345-349.

50. Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №4. С. 41-46.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSITIONING ACCURACY OF GNSS RTK SYSTEMS

Grigoriy A. Fokin, *The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia,*
grihafokin@gmail.com, fokin.ga@sut.ru

Anton O. Tishkov, *The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia,*
anton.tishkov.2000@mail.ru

The study was carried out with financial support from the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation on the topic: "Development of a fragment of a model hybrid orbital-ground communications network and conducting applied scientific research based on it," agreement No. 071-03-2026-010.

Abstract

Despite significant advances in terrestrial cellular network (4G LTE, 5G NR), and WiFi wireless local area network (WLAN) location services in recent years, centimeter-accurate real-time positioning services across federal geographic areas are currently available exclusively through global navigation satellite systems (GNSS) with differential correction systems (DCS). The most widely used GNSS systems are those with Real Time Kinematic (RTK) DCS. Geodetic-grade GNSS RTK hardware and software systems (HSS) with subscriptions to reference base station network services, in addition to high-quality hardware for receiving primary measurements, operate using proprietary software implementing highly efficient secondary post-processing algorithms, enabling millimeter-accurate coordinate estimates (CAE) in real time. In addition to high line-of-sight (LOS) accuracy, survey-grade GNSS RTK systems effectively compensate for multipath effects in full NLOS (Non-LOS) or partial Obstructed-LOS (OLOS) scenarios, where there is no direct line of sight between the rover antenna and GNSS satellites. More affordable and mass-produced consumer GNSS RTK devices cannot achieve comparable accuracy in either LOS or NLOS scenarios. Improving the positioning accuracy of consumer GNSS RTK systems by postprocessing primary GNSS measurements in the RTKLIB open-source library is a pressing and sought-after task. This paper presents an experimental study of the positioning accuracy of GNSS RTK systems using the PrinCe survey-grade software package. Coordinate estimates are obtained both directly from PrinCe and by postprocessing primary measurements in RTKLIB. The following parameters are analyzed: the root mean square deviation (RMS) of coordinate estimates, the number of satellites used, and the geometric factor of accuracy dilution. The aim of the study is to identify and substantiate ways to improve the positioning accuracy of GNSS RTK systems through postprocessing in RTKLIB in the absence of a partial line of sight (OLOS). The study demonstrated that preliminary spatial filtering of primary measurements by azimuth and elevation angle improves positioning accuracy compared to default postprocessing in RTKLIB. For the first time, for OLOS scenarios, a comparison was performed of the accuracy of coordinates obtained both directly from a geodetic-class hardware and via postprocessing in RTKLIB. The theoretical significance lies in the experimental substantiation of spatial filtering by azimuth and elevation angle in OLOS scenarios. The practical significance of the study lies in improving the positioning accuracy of consumer GNSS RTK systems without the use of antenna arrays.

Keywords: GNSS RTK, NMEA, RINEX, RTCM, PrinCe, RTKLIB, LOS, NLOS, OLOS, positioning.

References

- [1] Z. Z. M. Kassas, M. Maaref, J. J. Morales, J. J. Khalife, K. Shamei, "Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals," in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 36-52.
- [2] G. A. Fokin, D. B. Volgushev, V. N. Kharin, "Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals generation," *T-Comm*, 2022, vol. 16, no.5, pp. 28-47.
- [3] G. A. Fokin, "Model of 5G NR network positioning technology with meter accuracy. Part 1. PRS signal configuration," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 48-63.
- [4] G. A. Fokin, "Model of 5G NR network positioning technology with meter accuracy. Part 2. PRS signal processing," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 80-99.
- [5] G. A. Fokin, E. S. Bagaev, D. E. Meshcheryakov, "Positioning in IEEE 802.11az Wireless Local Area Networks. Part 1. Statement of the Problem of Achieving Decimeter Accuracy," in *The Last Mile*, 2025, no. 1 (125), pp. 50-56.
- [6] G. A. Fokin, "Development and evaluation of transceiver positioning methods in 6G cognitive radio systems," in *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.6, pp. 4-20.
- [7] G. A. Fokin, "Development and evaluation of 6G transceiver positioning methods in the near field," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.8, pp. 4-20.
- [8] G. A. Fokin, A. G. Vladko, "Positioning of Vehicles in Ultra-Dense V2X/5G Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 45-59.
- [9] G. A. Fokin, A. G. Vladko, "Positioning of Vehicles with the Fusion of Time of Arrival, Angle of Arrival and Inertial Measurements in the Extended Kalman Filter," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 51-67.
- [10] G. A. Fokin, D. E. Meshcheryakov, "Review of the capabilities of the PrinCe hardware and software complex for high-precision positioning using the RTK method," in *Economics and quality of communication systems*, 2025, no. 3 (37), pp. 77-95.
- [11] M. S. Grewal, A. P. Andrews, C. G. Bartone, *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, 4th ed. Wiley, 2020. 608 p.
- [12] Real Time Kinematics. NAVIPEDIA. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics
- [13] R. Odolinski, P. J. Teunissen, "Low-cost, high-precision, single-frequency GPS-BDS RTK positioning," in *GPS solutions*, 2017, vol. 21, no 3, pp. 1315-1330.
- [14] PrinCe i30VR. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i30vr/
- [15] PrinCe HCE620. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://prin.ru/kontrollery/prince/kontroller_prince_hce600/
- [16] PrinCe i90VR. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/
- [17] SparkFun RTK Surveying Kit. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-rtk-surveying-kit.html>
- [18] RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. Tomoji Takasu. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/tomoji-takasu/RTKLIB>

- [19] RINEX. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://igs.org/wg/rinex/>
- [20] Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM). Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.rtcmm.org/>
- [21] Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/>
- [22] NMEA Manual. SparkFun Electronics. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/3/2/f/a/NMEA_Reference_Manual-Rev2.1-Dec07.pdf
- [23] Geospider. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://geospider.ru/>
- [24] G. A. Fokin, "Positioning in conditions of no direct visibility using digital terrain models," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 11, pp. 4-13.
- [25] G. A. Fokin, A. H. Al-Odhari, "Processing of RDM measurements for positioning using unmanned aerial vehicles," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no. 7, pp. 52-58.
- [26] H. C. Hua, G. A. Fokin, "Comprehensive study of device positioning accuracy in LTE networks under non-line-of-sight conditions," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.8, pp. 13-28.
- [27] D. Meshcheryakov, G. Fokin, "Experimental Study of GNSS RTK Accuracy in LOS and NLOS Scenario," *2026 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 10-12 March. 2026. pp. 1-6.
- [28] Y. Bian, S. Cao, G. Wang, X. Qin, M. Hu and H. Qin, "A Stable RTK/MEMS-IMU Tightly-Coupled Algorithm Under Differential Corrections Outage," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, vol. 74, no. 8, pp. 12895-12906.
- [29] W. Lu, Y. Luo, C. Guo and W. Jiang, "An Iterated Equivariant Filter and Its Application in Tightly Coupled SINS/GNSS Integrated Navigation," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, vol. 74, pp. 1-14, art no. 9518314.
- [30] Y. -S. Yang and S. -S. Jan, "Enhanced Single Station PPP-RTK using CNES SSR Correction," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 2025, pp. 481-485.
- [31] R. Wang, J. Blanch and T. Walter, "Overbounding Time-correlated Errors for a Multi-constellation Precise Point Positioning Integrity Service," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 2025, pp. 235-243.
- [32] J. Hu, P. Li, J. Feng, F. Zhou, D. Yi and S. Bisnath, "Enhancing Smartphone Relative Positioning With Partial Wide-Lane Ambiguity Resolution: Path to Real-Time, Decimeter-Level Positioning in User Environments," in *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, vol. 12, no. 3, pp. 3177-3187.
- [33] F. Ruwisch and S. Sch?n, "Feature Map Aided Robust High Precision GNSS Positioning in Harsh Urban Environments," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 9, pp. 13721-13733.
- [34] C. Chen, Y. Ge, X. Zhao, C. Hu, X. Yang and X. Yu, "Improving Single-Frequency Multi-GNSS RTK/INS Tightly Coupled Integration by Mixing Time-Differenced and Double-Differenced Carrier Phase for Vehicle-Borne Positioning," in *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, vol. 12, no. 6, pp. 6696-6707.
- [35] J. Huang et al., "Pedestrian Navigation Using Waist-Mounted IMU and RTK," in *IEEE Sensors Journal*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 5510-5519.
- [36] X. Liu, T. Ballal and T. Y. Al-Naffouri, "Performance Analysis of Antenna Array-Aided RTK Positioning," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, vol. 61, no. 2, pp. 5325-5336.
- [37] J. Chun et al., "Performance Evaluation of the Latest Smartphones and Smartwatch Using GNSS Raw Measurements," in *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1527-1535.
- [38] Smartphone Decimeter Challenge. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm>
- [39] Differential GNSS. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS
- [40] PPK - Post Processing Kinematic. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sbg-systems.com/glossary/ppk-post-processing-kinematic/>
- [41] Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sbg-systems.com/technology/ambiguity-resolution-in-precise-point-positioning/>
- [42] A. Grosch, O.G. Crespillo, "Robust Railway Ground Truth and Confidence Bounds Estimation based on RTK/INS Forward-Backward Smoothing," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1336-1347.
- [43] J. Dampf, M. Bochkathi, T. Pany, "RTK performance of synthetic aperture processing on top of the ULB-PLL method with real-world urban GPS/Galileo L1/L5 signals," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1226-1238.
- [44] G. A. Fokin, "Features of the functioning of geographically distributed self-organizing radio communication networks with adaptive antenna systems," *T-Comm*, 2009, vol. 3, no.1, pp. 20-22.
- [45] G. A. Fokin, D. B. Volgushev, "Models for spatial selection during location-Aware beamforming in ultra-dense millimeter wave radio access networks," in *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 195-216.
- [46] I. V. Stepanets, G. A. Fokin, A. Mueller, "Capacity estimation ways of massive MIMO systems," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.10, pp. 64-69.
- [47] R. Wang et al., "RTK-LIO: Tightly Coupled RTK/LiDAR/Inertial Navigation System Based on Optimization Approach," in *IEEE Sensors Journal*, 2025, vol. 25, no. 13, pp. 26220-26227.
- [48] M. Spanghero, P. Papadimitratos, "UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 316-327.
- [49] Y. Cai, P. Cheng, X. Meng, W. Tang and C. Shi, "Using network RTK corrections and low-cost GPS receiver for precise mass market positioning and navigation applications," *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 2011, pp. 345-349.
- [50] G.A. Fokin, Abdulwahab Hussein Al-odhari, "Positioning of the moving radiation source using time difference of arrival method", *T-Comm*, vol. 11, no.4, pp. 41-46.

Information about authors:

Grigoriy A. Fokin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0002-5358-1895

Anton O. Tishkov, Assistant of the Department of Wireless Technologies and Systems of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ДИСКРИМИНАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОИМПУЛЬСНОГО ПЕЛЕНГАТОРА ПРИ СОВМЕШНОМ ПРИЁМЕ КОГЕРЕНТНОЙ ПОМЕХИ И ЭХО СИГНАЛА

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-23-35

Кузнецов Юрий Владимирович,

Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия,
kuznetsov@mai.ru

Баев Андрей Борисович,

Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия,
baev@mai.ru

Егорычев Руслан Олегович,

Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия,
roegorychev@mai.education

Manuscript received 17 April 2026;

Accepted 20 June 2026

Ключевые слова: Самозащита самолёта,
радиоэлектронное подавление, когерентная
помеха, моноимпульсный пеленгатор,
дискриминационная характеристика

Моноимпульсный амплитудный суммарно разностный пеленгатор (далее - пеленгатор) активно применяется в угломерных следящих системах в составе авиационных средств поражения. Для защиты от авиационных средств поражения применяют средства радиоэлектронного подавления, оказывающие влияние на выработку информации пеленгатором о пространственном положении летательного аппарата. В настоящей статье рассматривается сценарий постановки двухточечной когерентной помехи активному пеленгатору средством радиоэлектронного подавления, которым снабжён защищаемый летательный аппарат. Воздействие двухточечной когерентной помехи на пеленгатор можно оценить через изменение его дискриминационной характеристики. Упомянутое изменение проявляется в двух основных формах: смещении равносигнального направления дискриминационной характеристики и изменении крутизны её линейного участка. В целях исследования изменения дискриминационной характеристики в статье представлена модель пеленгатора, учитывающая ряд ключевых параметров: взаимное положение пеленгатора и защищаемого летательного аппарата-постановщика (включая расстояние между ними и их ориентацию); амплитуды эхо-сигнала и когерентной помехи; разность фазы сигналов, излучаемых двумя разнесёнными антеннами средства радиоэлектронного подавления, формирующего когерентную помеху; азимут базы летательного аппарата-постановщика двухточечной когерентной помехи. Ключевой особенностью данной модели является то, что процесс постановки двухточечной когерентной помехи пеленгатору выполняется с учётом приёма его эхо-сигнала. В статье также приводится вывод выражений, описывающий приём аддитивной смеси эхо сигнала и когерентной помехи, с учётом указанных ранее параметров, на базе которых разработана модель.

Информация об авторах:

Кузнецов Юрий Владимирович, д.т.н. (2005), профессор (2007), заведующий кафедрой теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2012). Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (2020), Москва, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-1194-3445>

Баев Андрей Борисович, к.т.н. (2002), доцент (2007), доцент кафедры теоретической радиотехники (405), начальник научно-исследовательского отдела кафедры 405 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-3829-1379>

Егорычев Руслан Олегович, аспирант кафедры теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия

Для цитирования:

Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Егорычев Р.О. Оценка изменения дискриминационной характеристики моноимпульсного пеленгатора при совместном приёме когерентной помехи и эхо сигнала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 23-35.

For citation:

Y.V. Kuznetsov, A.B. Baev, R.O. Egorychev, "Effect of Simultaneous Cross-Eye Jamming and Target Echo on the Monopulse Discrimination Characteristic," T-Comm, 2026, vol. 20, no.7, pp. 23-35. (in Russian)

Введение

Моноимпульсный амплитудный суммарно-разностный пеленгатор (далее – пеленгатор) используется в составе углового координатора [1, 2], вырабатывающего информацию об угловом положении цели для подачи команд управления авиационным средством поражения (АСП). Радиоэлектронное подавление (РЭП) оказывает негативный эффект на способность пеленгатора определять угловое положение цели, что в свою очередь ограничивает возможности успешного применения АСП.

Теория моноимпульсной пеленгации достаточно полно освещена как в отечественных, так и в зарубежных научных изданиях. В российской научной школе фундаментальные основы представлены в трудах Леонова А. И. и Фомичёва К. И. [3, 4], а также в современных учебных и справочных изданиях [5, 6]. Среди зарубежной литературы можно сослаться на работы [7-11]: в монографии [7] приведены примеры практической реализации современных моноимпульсных пеленгаторов; учебники [8, 9] содержат типовые сценарии применения моноимпульсной пеленгации для сопровождения целей. В монографиях [10, 11] разобрана теория реализации антенных систем для моноимпульсных пеленгаторов.

Ряд недавних исследований [12-16] посвящён различным аспектам повышения точности и помехоустойчивости моноимпульсных пеленгационных систем. Так, в работе [12] предложен подход к компенсации помех в угловом измерителе средствами радиотехнической разведки; в [13] проведён анализ влияния амплитудных погрешностей на точностные параметры двухканального фазового пеленгатора с фазированной антенной решёткой. Статья [14] демонстрирует реализацию широкополосного пеленгатора на базе программно-определяемого радио, а в [15] представлены результаты моделирования углового фазового дискриминатора с адаптивной антенной решёткой. Кроме того, в [16] изучено влияние распределения блестящих точек на статистические характеристики углового шума при использовании импульсного зондирующего сигнала в моноимпульсном пеленгаторе.

Развитие теории моноимпульсной пеленгации обусловило развитие современных методов РЭП, направленных на нарушение процесса определения углового положения целей. Одним из методов РЭП угломерным системам является когерентная помеха, описание которой можно найти в ряде источников [17-20]. Монография [17] является одним из первых отечественных трудов, где изложен способ постановки когерентной помехи. Более развёрнутое рассмотрение маскирующих и имитационных помех, включая когерентные, представлено в работах [18, 19], а справочник по РЭП [20] содержит систематизированное описание множества типов преднамеренных помех. В работе [21] изучается модуляция амплитудного соотношения, являющегося одним из параметров когерентной помехи. Здесь же рассматривается постановка комбинированной когерентной и уводящей по скорости помех. Исследования [22–23] посвящены анализу искажения фронта волны и оценке возникающих при этом ошибок определения углового направления.

Интерес к проблематике постановки когерентных помех сохраняется и в современных публикациях [24-29]. Так, в [24] предложена методика расчёта вероятности передачи ложной

отметки на вторичную обработку радиолокационной информации при воздействии частично когерентных помех. В работе [25] оценивается эффективность постановки когерентной помехи в секторе, ограниченном допустимыми отклонениями амплитудно-фазовых соотношений. Вопросы помехоустойчивости моноимпульсных средств пеленгации от когерентных помех рассмотрены в [26-28], а в [29] представлен алгоритм, позволяющий повысить эффективность средств постановки данной помехи.

Зарубежные исследования также активно развивают направление когерентного радиоэлектронного воздействия. Например, в статье [30] предложен цифровой метод постановки когерентной помехи, а работа [31] описывает сценарий её обнаружения и постановки в отношении многоканального радиолокатора. Публикация [32] содержит математическую модель воздействия когерентной помехи на радиолокационную систему, сочетающую принципы активной и пассивной радиолокации. Наконец, в статье [33] исследуется влияние точности задания амплитудного соотношения и разности фазы на общую эффективность постановки когерентной помехи.

Рост числа современных публикаций, посвящённых вопросам моноимпульсной пеленгации и применения когерентной помехи, свидетельствует об актуальности данных направлений.

Статья содержит описание нового подхода к определению пеленгатором направления на защищаемый летательный аппарат, оснащённый средством постановки когерентной помехи в условиях приёма аддитивной смеси эхо-сигнала и двухточечной когерентной помехи.

В статье исследуется изменение дискриминационной характеристики, а именно – смещение равносигнального направления и изменение крутизны её линейного участка. В работе представлены математические модели сигналов пеленгатора и когерентной помехи. Приведена структурная схема пеленгатора, дополненная кратким описанием функциональных элементов. Анализ выполнен в рамках ряда заданных условий и ограничений:

- В качестве углового датчика пеленгатора выступает линейная антенная решётка;
- В роли защищаемого летательного аппарата выступает самолёт;
- Область определения направления на самолёт ограничена шириной диаграммы направленности используемой линейной антенной решётки;
- Защищаемый самолёт в модели рассматривается как точечный излучатель;
- Оценка направления на самолёт выполняется пеленгатором в течение длительности одного радиоимпульса;
- Модели эхо-сигнала и когерентной помехи представлены комплексными амплитудами;

Влияние эффекта Доплера в рамках данной модели не рассматривается.

1 Математические модели сигналов пеленгатора

Синфазная линейная антенная решётка (АР) пеленгатора излучает зондирующий сигнал в направлении максимума диаграммы направленности (ДН) под углом θ_D в соответствии с рис. 1 (а).

сдвига зависит от номера элемента линейной АР, подключённого к фазовращателю, и требуемого угла отклонения максимума парциальной ДН относительно нормали к АР. Направление отклонения максимума ДН относительно РСН определяется знаком перед значением фазового сдвига.

В рамках рассматриваемой работы максимумы парциальных ДН смещены друг относительно друга на величину, равную ширине ДН при условии, что её максимум ориентирован вдоль нормали к линейной АР. При равномерном амплитудном распределении ширина ДН приближённо рассчитывается по формуле [10–11, 34]:

$$\Delta\Theta \approx 0,89 \frac{\lambda}{(2N+1)d} \quad (5)$$

Смещение максимумов парциальных ДН друг относительно друга на угол $\Delta\Theta$ обеспечивает максимальное усиление в суммарном канале и повышенную крутизну дискриминационной характеристики [3, 4, 7]. Чтобы реализовать данное смещение, каждую парциальную ДН необходимо отклонить от нормали к линейной АР в противоположные стороны на угол $0,5\Delta\Theta$.

Сдвиг максимума одной из парциальных ДН влево относительно нормали к АР на половину ширины (5) достигается за счёт настройки левой линейки фазовращателей (см. рис. 2), величина фазового сдвига n -го элемента которого может быть определена, как:

$$n\phi_0 = n \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \frac{\Delta\Theta}{2} \quad (6)$$

где $n = [-N, N]$ – номер фазовращателя; ϕ_0 – величина фазового сдвига, обусловленная отклонением максимума парциальной ДН. Чтобы сместить максимум второй парциальной ДН вправо, требуется установить значение фазового сдвига в n -ом элементе в соответствии с выражением:

$$-n\phi_0 = -n \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \frac{\Delta\Theta}{2} \quad (7)$$

На выходах двух сумматоров формируются суммы гармонических колебаний эхо-сигнала, предварительно сдвинутых по фазе, в соответствии с выражениями (6) и (7). Левый и правый сумматоры формируют соответственно синфазные левый и правый каналы пеленгатора. Гармонические колебания в данных каналах могут быть представлены комплексными амплитудами $V_{\text{л}}$ и $V_{\text{п}}$:

$$V_{\text{л}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-N}^N V_0 e^{-jn(\phi_T + \phi_0)}, V_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-N}^N V_0 e^{-jn(\phi_T - \phi_0)}. \quad (8)$$

Используя формулу суммы конечной геометрической прогрессии, выражения (8) преобразуются к чисто действительному виду и принимают следующую форму:

$$V_{\text{л}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 \frac{\sin \left[\frac{(2N+1)}{2} (\phi_T + \phi_0) \right]}{\sin \left(\frac{1}{2} (\phi_T + \phi_0) \right)}, V_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 \frac{\sin \left[\frac{(2N+1)}{2} (\phi_T - \phi_0) \right]}{\sin \left(\frac{1}{2} (\phi_T - \phi_0) \right)}. \quad (9)$$

Выражения (9) описывают частный случай, когда амплитуды V и фазы ϕ_T, ϕ_0 гармонических колебаний в левом и правом каналах совпадают и не искажаются вследствие неидентичных амплитудно-фазовых характеристик фидерных трактов пеленгатора.

В общем случае амплитуды $V_{\text{л}}$ и $V_{\text{п}}$ носят комплексный характер из-за различных амплитудно-фазовых характеристик фидерных трактов. Соответственно, амплитуды и фазы гармонических колебаний в левом и правом каналах могут не совпадать. В рамках данной статьи принято допущение об идентичности амплитудно-фазовых характеристик фидерных трактов левого и правого каналов. Это даёт основание считать, что амплитуды V_0 с фазами ϕ_T, ϕ_0 не подвержены случайным флуктуациям.

Выражения (9) допускают компактную запись с применением формулы ядра Дирихле.

$$D_N(x) = \frac{\sin \left[\frac{(2N+1)}{2} x \right]}{2 \sin \left(\frac{1}{2} x \right)}. \quad (10)$$

Таким образом, амплитуды эхо-сигнала в левом и правом каналах, описываемые выражениями (9), можно представить в компактной форме:

$$V_{\text{л}} = \frac{2}{\sqrt{2}} V_0 D_N(\phi_T + \phi_0), V_{\text{п}} = \frac{2}{\sqrt{2}} V_0 D_N(\phi_T - \phi_0). \quad (11)$$

Множитель 2 в выражениях (11) появляется из-за того, что формула ядра Дирихле (10) содержит двойку в знаменателе.

Гармонические колебания с амплитудами $V_{\text{л}}$ и $V_{\text{п}}$ поступают на преобразователь, где выполняются операции сложения и вычитания. На выходе преобразователей формируются суммарный и разностный каналы. Различные типы преобразователей вместе с их математическим описанием представлены в источниках [3, 4, 7–9].

Если в качестве преобразователя использовать модель Т-моста, то на основе выражений (9) амплитуды гармонических колебаний в суммарном V_{Σ} и разностном V_{Δ} каналах будут иметь следующий вид:

$$V_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [V_{\text{л}} + V_{\text{п}}], V_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{2}} [V_{\text{л}} - V_{\text{п}}]. \quad (12)$$

Гармонические колебания из суммарного и разностного каналов поступают на вход углового дискриминатора. На его выходе формируется значение, величина которого пропорциональна пеленгу самолёта θ_T . Зависимость данного значения от пеленга θ_T и представляет собой дискриминационную характеристику.

Различные варианты исполнения угловых дискриминаторов описаны в работах [3, 4, 7–9]. При использовании модели идеального моноимпульсного процессора [9] значение на его выходе, с учётом выражений (12), будет иметь следующий вид:

$$V_{\theta_T} = \frac{V_{\Delta}}{V_{\Sigma}}. \quad (13)$$

В зависимости от аппаратной реализации указанная величина может представляться либо в виде амплитуды напряжения, либо в форме цифрового кода.

2 Математическая модель когерентной помехи

На рис. 3 представлена структурная схема постановщика когерентной помехи (ПП) ретрансляционного типа, размещённого на борту защищаемого самолёта. В работе данного постановщика зондирующий сигнал пеленгатора служит основой для формирования помехи.

Фронт электромагнитной волны зондирующего сигнала пеленгатора падает на антенну A_1 с направления ψ . На выходе антенны A_1 формируется гармоническое колебание зондирующего сигнала (далее – сигнал), который через антенный переключатель (АП) поступает в приёмник. Через определённый промежуток времени фронт этой же электромагнитной волны, проходящей с направления ψ , достигает антенны A_2 и далее в форме сигнала, через отдельный АП, подаётся на вход приёмника.

Принятые сигналы поступают в приёмник, где они усиливаются, преобразуются в цифровую форму и передаются в процессор. Процессор определяет временную задержку между приёмом двух сигналов, сохраняет один из них в цифровом запоминающем устройстве (ЦЗУ) и формирует на выходе пару аналоговых сигналов, сдвинутых друг относительно друга на величину измеренной задержки.

Благодаря записи сигнала в ЦЗУ постановщик способен излучать когерентную помеху синхронно с отражением зондирующего сигнала пеленгатора в следующий момент его приёма. Полученная пара сигналов с внесённой задержкой направляется в передатчик для усиления перед излучением.

Один из сигналов на выходе передатчика проходит через управляемый фазовращатель, который добавляет дополнительный фазовый сдвиг ξ . В итоге оба сигнала поступают на АП и излучаются антеннами A_1 и A_2 в том же направлении, откуда был принят фронт волны зондирующего сигнала.

В рамках рассматриваемой статьи антенны A_1 и A_2 рассматриваются, как точечные излучатели, а амплитудно-фазовые характеристики их фидерных трактов принимаются идентичными.

На рис. 3 пунктирными линиями обозначены каналы управления, посредством которых процессор регулирует работу управляемого фазовращателя, устанавливает коэффициенты усиления передатчика и управляет положением пары АП.

На рис. 4 показана геометрическая постановка задачи приёма когерентной помехи линейной АР.

Нормаль к базе b ПП ориентирована под углом ψ относительно линии визирования R . При этом линия визирования соединяет фазовый центр линейной АР с точкой B – серединой базы ПП, которая совпадает с центром защищаемого самолёта.

Угол пеленга θ_T определяет положение линии визирования относительно нормали к линейной АР. Углы θ_1 и θ_2 задают направления на антенны A_1 и A_2 соответственно относительно фазового центра линейной АР.



Рис. 3. Структура постановщика помехи ретрансляционного типа

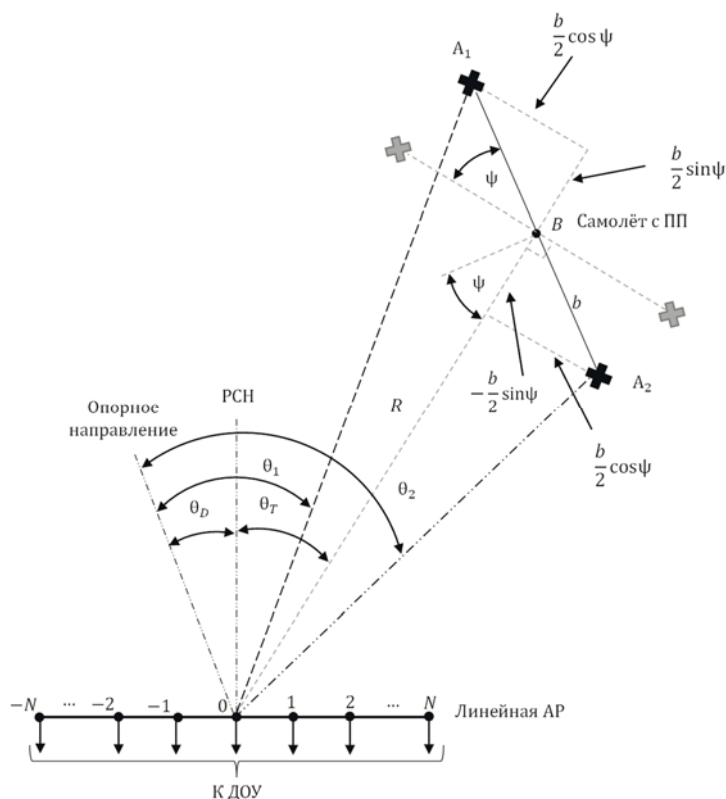


Рис. 4. Геометрическая постановка задачи приёма когерентной помехи линейной АР

Углы θ_1 и θ_2 зависят от ряда параметров: опорного направления θ_D , пеленга самолёта θ_T , расстояния R , а также ориентации базы постановщика помехи ψ . Их значения могут быть определены на базе следующих выражений:

$$\theta_1 = \theta_D + \theta_T - \arctg \frac{b \cos \psi}{2R + b \sin \psi}, \quad (14)$$

$$\theta_2 = \theta_D + \theta_T + \arctg \frac{b \cos \psi}{2R - b \sin \psi}. \quad (15)$$

Электромагнитные волны, излучаемые антеннами A_1 и A_2 , интерферируют между собой. Как следствие, вблизи линейной АР возникает результирующая электромагнитная волна когерентной помехи.

Если принять допущение о линейности фазовых фронтов, которые создают разнесённые антенны A_1 и A_2 , то вблизи n -го элемента линейной АР когерентную помеху можно описать с помощью комплексной амплитуды $\dot{E}_n$:

$$\dot{E}_n = E_1 e^{-jn\phi_1} + E_2 e^{-j(n\phi_2 + \xi)}, \quad (16)$$

где E_1 и E_2 – амплитуды электрических полей, излученных антеннами A_1 и A_2 ; $\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1$ и

$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2$ – фазовые набегивы вдоль линейной АР, образованные в результате приёма фазовых фронтов, сформированных антеннами A_1 и A_2 с направлений θ_1 и θ_2 соответственно.

Принимая во внимание фазовые сдвиги, заданные выражениями (6) и (7), комплексные амплитуды когерентной помехи в левом и правом каналах, по аналогии с формулой (8), можно записать в следующем виде:

$$\dot{V}_n = \sum_{n=-N}^N \left[V_1 e^{-jn(\phi_1 + \phi_0)} + V_2 e^{-j(n(\phi_2 + \phi_0) + \xi)} \right], \quad (17)$$

$$\dot{V}_n = \sum_{n=-N}^N \left[V_1 e^{-jn(\phi_1 - \phi_0)} + V_2 e^{-j(n(\phi_2 - \phi_0) + \xi)} \right]. \quad (18)$$

С помощью формул суммы конечной геометрической прогрессии и ядра Дирихле выражения (17) и (18) можно преобразовать к следующему виду:

$$\dot{V}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} V_1 D_N(\phi_1 + \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_2 D_N(\phi_2 + \phi_0) e^{-j\xi}, \quad (19)$$

$$\dot{V}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} V_1 D_N(\phi_1 - \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_2 D_N(\phi_2 - \phi_0) e^{-j\xi}. \quad (20)$$

Поскольку амплитудно-фазовые характеристики фидерных трактов пеленгатора приняты идентичными, амплитуды V_1 , V_2 и фазы ϕ_1 , ϕ_2 не подвержены случайным изменениям.

3 Математическая модель аддитивной смеси эхо-сигнала и когерентной помехи

На базе выражений эхо-сигнала (11) и когерентной помехи (19), (20) можно сформировать результирующие выражения для их аддитивных смесей в левом и правом каналах пеленгатора:

$$\dot{V}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} V_0 D_N(\phi_1 + \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_1 D_N(\phi_1 + \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_2 D_N(\phi_2 + \phi_0) e^{-j\xi}, \quad (21)$$

$$\dot{V}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} V_0 D_N(\phi_1 - \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_1 D_N(\phi_1 - \phi_0) + \frac{2}{\sqrt{2}} V_2 D_N(\phi_2 - \phi_0) e^{-j\xi}. \quad (22)$$

Для упрощения дальнейшего анализа абсолютные значения амплитуд V_0 , V_1 , V_2 в выражениях (21) и (22) можно заменить относительными величинами ρ и a путём нормировки относительно V_0 :

$$\dot{v}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_1 + \phi_0) + \rho \left[\frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_1 + \phi_0) + a \frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_2 + \phi_0) e^{-j\xi} \right] \quad (23)$$

$$\dot{v}_n = \frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_1 - \phi_0) + \rho \left[\frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_1 - \phi_0) + a \frac{2}{\sqrt{2}} D_N(\phi_2 - \phi_0) e^{-j\xi} \right] \quad (24)$$

где, ρ – коэффициент усиления когерентной помехи над эхо-сигналом. Коэффициент a характеризует соотношение амплитуд сигналов, т.е. во сколько раз сигнал, излучённый антенной A_2 самолёта-постановщика когерентной помехи, превышает по уровню сигнал, излучённый антенной A_1 . Коэффициент a принято называть амплитудным соотношением.

На выходе преобразователя формируются нормированные значения суммы $\dot{v}_\Sigma$ и разности $\dot{v}_\Delta$ комплексных амплитуд, заданных выражениями (23) и (24):

$$\dot{v}_\Sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} [\dot{v}_n + \dot{v}_n], \quad \dot{v}_\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} [\dot{v}_n - \dot{v}_n]. \quad (25)$$

Гармонические колебания в суммарном и разностном каналах поступают на угловой дискриминатор, формирующий на своём выходе значение:

$$V_{\theta_r}^* = Re \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\}, \quad (26)$$

пропорциональное итоговому взаимодействию когерентной помехи и эхо-сигнала.

На рис. 5 представлена схема пеленгации самолёта: на законцовках защищаемого воздушного судна размещена пара антенн A_1 и A_2 . С помощью механического привода линейная АР ориентируется так, чтобы пеленг самолёта располагался вблизи РСН.

Все функциональные элементы схемы, за исключением крайнего правого, были описаны ранее. На рис. 5 крайний правый элемент является стробирующим устройством. Оно ограничивает величину $V_{\theta_r}^*$ шириной линейного участка дискриминационной характеристики.

Одним из способов реализации углового стробирования является нелинейное преобразование дискриминационной характеристики. Принцип данного стробирования состоит в том, что пеленгатор формирует на своём выходе неизменное ограниченное значение $U_{огр}$, если величина $V_{\theta_r}^*$ превосходит линейный участок дискриминационной характеристики, определяемый шириной ДН антенны пеленгатора, т.е. линейной АР [35].

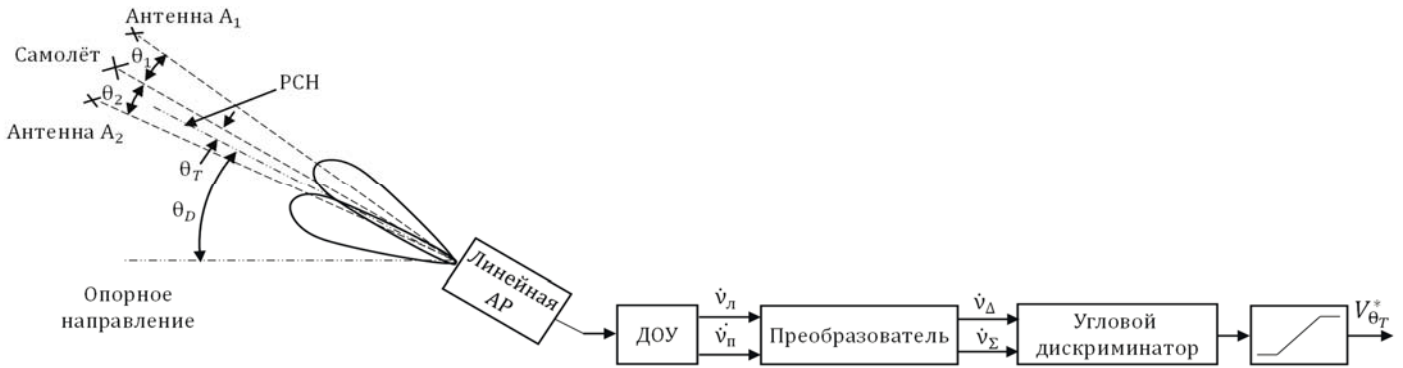


Рис. 5. Схема пеленгации самолёта с установленной парой антенн A_1 и A_2 на законцовках

Значение ограничения $U_{\text{огр}}$ можно определить, используя ширину ДН линейной АР и крутизну дискриминационной характеристики S_0 :

$$V_{\theta_T}^* = \begin{cases} \text{Re} \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\}, & \text{при } \left| \text{Re} \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\} \right| \leq U_{\text{огр}} = \frac{\Delta\Theta}{2} S_0 \\ -U_{\text{огр}}, & \text{при } \text{Re} \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\} < -U_{\text{огр}} \\ U_{\text{огр}}, & \text{при } \text{Re} \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\} > U_{\text{огр}} \end{cases}, \quad (27)$$

где крутизна дискриминационной характеристики S_0 определяется наклоном её линейного участка вблизи РСН и рассчитывается с помощью выражения (13):

$$S_0 = \left. \frac{d V_\Delta}{d \theta V_\Sigma} \right|_{\theta=0}. \quad (28)$$

Индекс 0 в обозначении крутизны дискриминационной характеристики означает то, что она рассчитывается в условиях отсутствия постановки преднамеренных помех.

В качестве демонстрации на рис. 6 показана дискриминационная характеристика, построенная по данным из табл. 1 в соответствии с выражениями (27) и (28).

Таблица 1

Параметры для построения дискриминационной характеристики на рис. 6

Параметр	$R, \text{ м}$	ξ°	a	ρ	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	0	0	0	0	0	0,03	0,015	10

Как видно из табл. 1, используемые параметры соответствуют случаю, при котором дискриминационная характеристика построена без воздействия двухточечной когерентной помехи.

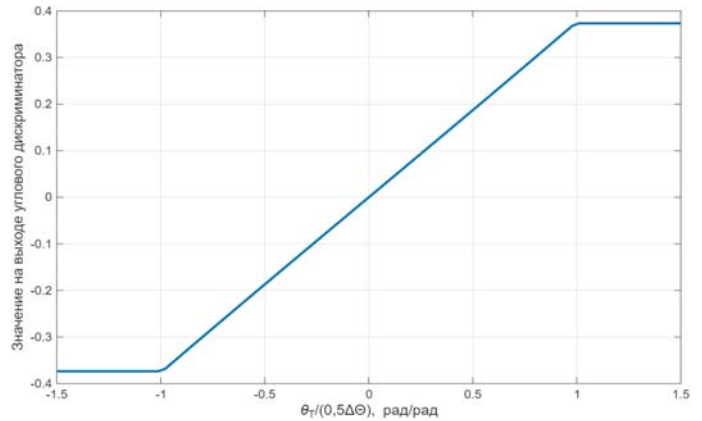


Рис. 6. Общий вид дискриминационной характеристики в пределах ширины ДН линейной АР

Ось абсцисс дискриминационной характеристики на рис. 6 нормирована таким образом, что в интервале относительных углов $[-1; 1]$ укладывается ширина ДН линейной АР $\Delta\Theta$. На рис. 6 видно воздействие углового стробирования на вид дискриминационной характеристики – она переходит в режим насыщения, когда угол θ_T превосходит по величине ширину ДН линейной АР.

Крутизна дискриминационной характеристики, рассчитанная численным методом при помощи известных математических пакетов, в соответствии с выражением (28) составляет порядка $S_0 = 18$ ед/рад.

4 Исследование изменения дискриминационной характеристики под воздействием двухточечной когерентной помехи

В данном разделе рассматривается изменение дискриминационной характеристики, а именно, – смещение её РСН и изменение крутизны линейного участка, под воздействием двухточечной когерентной помехи.

Рассмотрим смещение РСН дискриминационной характеристики при изменении амплитудного соотношения и разности фазы двухточечной когерентной помехи.

На рис. 7 показано семейство дискриминационных характеристик, построенное для разных значений разности фазы когерентной помехи ξ в соответствии с выражениями (27) и (28). Данные для построения семейства на рис. 7 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры для построения семейства на рис. 7

Параметр	$R, \text{ м}$	ξ°	a	ρ	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	0	1	1	15	0	0,03	0,015	10
		160							
		170							
		180							

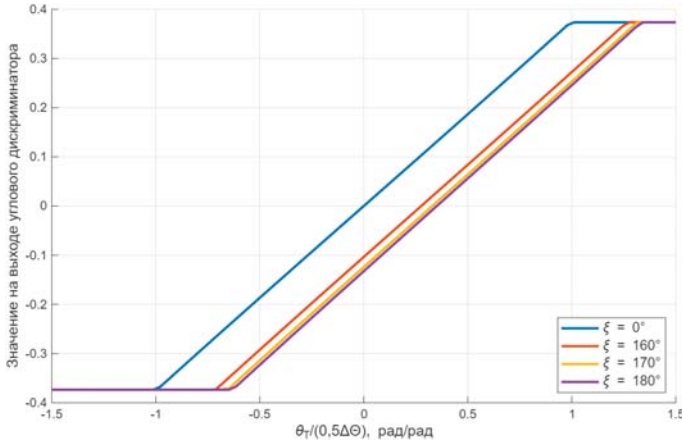


Рис. 7. Семейство дискриминационных характеристик при разных ξ и $\rho = 1$

На рис. 7 продемонстрировано смещение семейства дискриминационных характеристик вправо вдоль оси абсцисс по мере того, как разность фаз когерентной помехи ξ приближается к 180° . Диапазон возможных значений ξ составляет $[0, 360^\circ]$. Хотя это не отражено на рис. 7, дальнейшее увеличение ξ сверх 180° возвращает дискриминационную характеристику к исходному состоянию, при котором РСН пересекается в точке θ_T . Таким образом наблюдается симметрия смещения дискриминационной характеристики относительно разности фаз $\xi = 180^\circ$.

На рис. 8 представлено семейство дискриминационных характеристик, рассчитанных при фиксированной разности фазы когерентной помехи $\xi = 180^\circ$ для различных значений коэффициента усиления помехи ρ . Выбор значения $\xi = 180^\circ$ обусловлен тем, что, как продемонстрировано на рис. 7, именно при такой разности фаз наблюдается максимальное смещение дискриминационной характеристики. Исходные данные, использованные для построения семейства характеристик на рис. 8, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры для построения семейства на рис. 8

Параметр	$R, \text{ м}$	ξ°	a	ρ	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	180	1	0	15	0	0,03	0,015	10
				1					
				3					
				10					

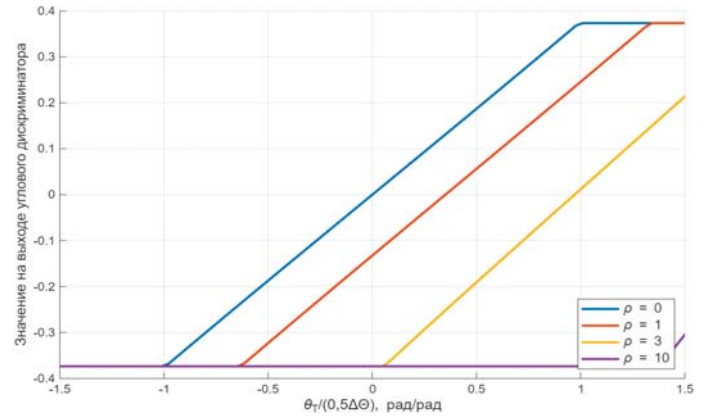


Рис. 8. Семейство дискриминационных характеристик при разных ρ и $\xi = 180^\circ$

На рис. 8 рост коэффициента усиления когерентной помехи ρ приводит к существенному увеличению смещения семейства дискриминационных характеристик вдоль оси абсцисс относительно исходного состояния (при $\rho = 0$, т.е. при отсутствии двухточечной когерентной помехи). При значительном усилении когерентной помехи (при $\rho > 3$, как показано на рис. 8) смещение характеристики становится настолько выраженным, что при $\theta_T = 0^\circ$ пеленгатор переходит в режим насыщения.

На рис. 9 представлено семейство дискриминационных характеристик, рассчитанных для различных значений разности фазы когерентной помехи ξ при фиксированном коэффициенте усиления $\rho = 10$. Данный случай отличается от показанного на рис. 7, где коэффициент усиления составлял $\rho = 1$. Исходные данные, использованные для построения семейства характеристик на рис. 9, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры для построения семейства на рис. 9

Параметр	$R, \text{ м}$	ξ°	a	ρ	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	0	1	10	15	0	0,03	0,015	10
		16							
		170							
		180							

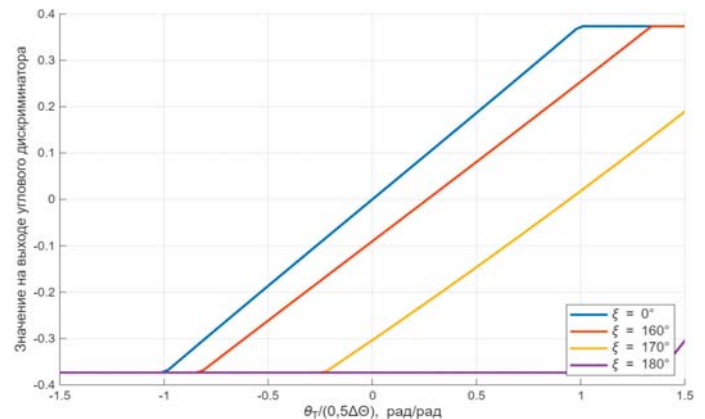


Рис. 9. Семейство дискриминационных характеристик при разных ξ и $\rho = 10$

Существенное отличие семейства дискриминационных характеристик, представленных на рис. 9, от ранее показанных на рис. 7 заключается в том, что при приближении разности фазы когерентной помехи ξ к 180° наблюдается не только смещение РСН вдоль оси абсцисс, но и изменение крутизны линейного участка дискриминационной характеристики.

Изменение крутизны линейного участка дискриминационной характеристики рассматривается при различных значениях амплитудного соотношения a , коэффициента усиления ρ и разности фазы двухточечной когерентной помехи ξ , а также при различных расстояниях от пеленгатора до самолёта-постановщика R и его ориентации базы ψ . Расчёт крутизны будет выполнен на основании выражения (28), в котором выражение (13) заменено на (26), то есть:

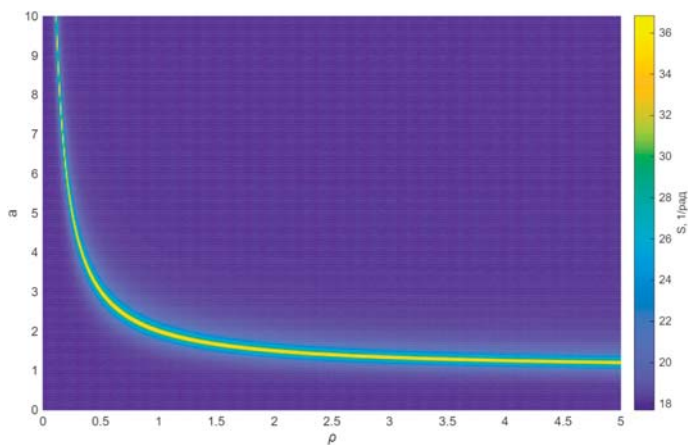
$$S = \frac{d}{d\theta} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{v}_\Delta}{\dot{v}_\Sigma} \right\} \bigg|_{\theta=0}. \quad (29)$$

На рис. 10 представлена поверхность, отражающая зависимость крутизны линейного участка дискриминационной характеристики от двух параметров: коэффициента усиления когерентной помехи ρ и амплитудного соотношения a . Исходные данные для построения данной поверхности приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры для построения поверхности на рис. 10

Параметр	$R, \text{ м}$	ξ°	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	180	15	0	0,03	0,015	10

Рис. 10. Крутизна дискриминационной характеристики в зависимости от ρ и a

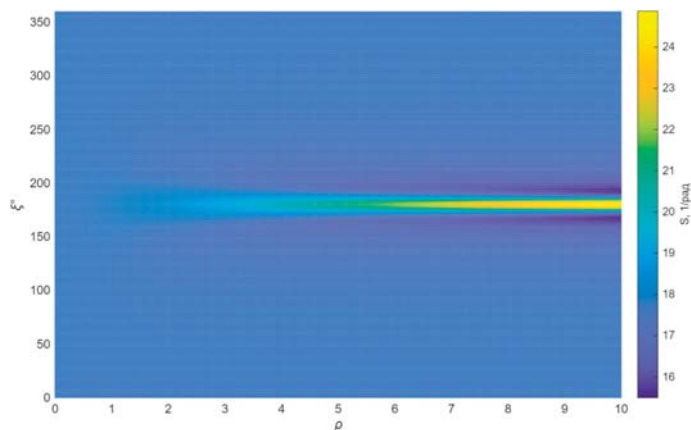
Поверхность, представленная на рис. 10, показывает, что при определённой комбинации коэффициента усиления когерентной помехи ρ и амплитудного соотношения a крутизна линейного участка дискриминационной характеристики S возрастает вдвое по сравнению со случаем отсутствия когерентной помехи S_0 , достигая примерно 36 ед/рад. При росте коэффициента усиления когерентной помехи ρ максимальные значения крутизны сосредотачиваются в окрестности амплитудного соотношения a , равного единице.

На рис. 11 представлена поверхность, показывающая зависимость крутизны линейного участка дискриминационной характеристики S от двух параметров: коэффициента усиления когерентной помехи ρ и разности её фазы ξ . Параметры, использованные для построения данной поверхности, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры для построения поверхности на рис. 11

Параметр	$R, \text{ м}$	a	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	1	15	0	0,03	0,015	10

Рис. 11. Крутизна дискриминационной характеристики в зависимости от ρ и ξ

Как было показано на рис. 9, анализ поверхности на рис. 11 подтверждает рост крутизны дискриминационной характеристики S при приближении разности фазы когерентной помехи ξ к 180° . При этом закономерно прослеживается увеличение крутизны S по мере роста коэффициента усиления когерентной помехи ρ . Вместе с тем на поверхности (рис. 11) выявлены участки в окрестности 180° , где крутизна снижается вплоть до значений, меньших, чем в случае отсутствия двухточечной когерентной помехи, т.е. $S < S_0$.

На рис. 12 представлена поверхность, отражающая зависимость крутизны линейного участка дискриминационной характеристики S от двух параметров: разности фазы когерентной помехи ξ и ориентации базы самолёта-постановщика ψ (см. рис. 4). Исходные данные, использованные для построения поверхности, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметры для построения поверхности на рис. 12

Параметр	$R, \text{ м}$	a	ρ	$b, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	N
Значение	2000	1	10	15	0,03	0,015	10

Согласно рис. 12, отклонение нормали к базе самолёта-постановщика двухточечной когерентной помехи относительно линии визирования R (см. рис. 4) обуславливает снижение крутизны дискриминационной характеристики S . При этом подтверждено, что максимальные значения крутизны S локализуются в окрестности 180° , независимо от ориентации

базы самолёта-постановщика ψ , за исключением, когда нормаль к его базе перпендикулярна линии визирования – в данном случае $S = S_0$.

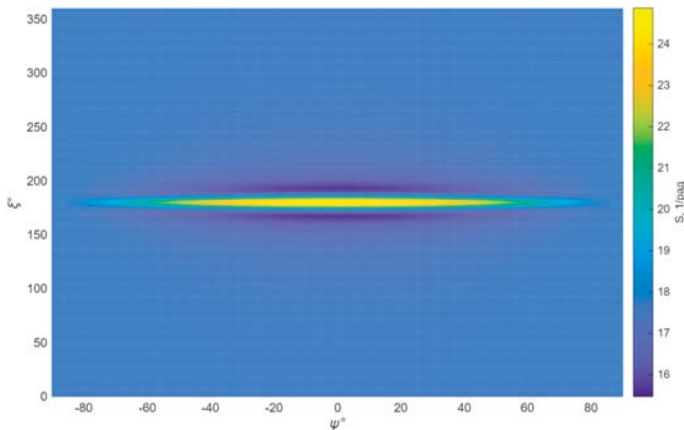


Рис. 12. Крутизна дискриминационной характеристики в зависимости от ψ и ξ

На рис. 13 представлена поверхность, отражающая зависимость крутизны линейного участка дискриминационной характеристики S от двух параметров: расстояния между пеленгатором и самолётом-постановщиком R , а также коэффициента усиления когерентной помехи ρ . Исходные данные, использованные для построения поверхности, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Параметры для построения поверхности на рис. 13

Параметр	ξ°	a	$b, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	ψ°	$\lambda, \text{ м}$	$d, \text{ м}$
Значение	180	1	15	0	0,03	0,015	10

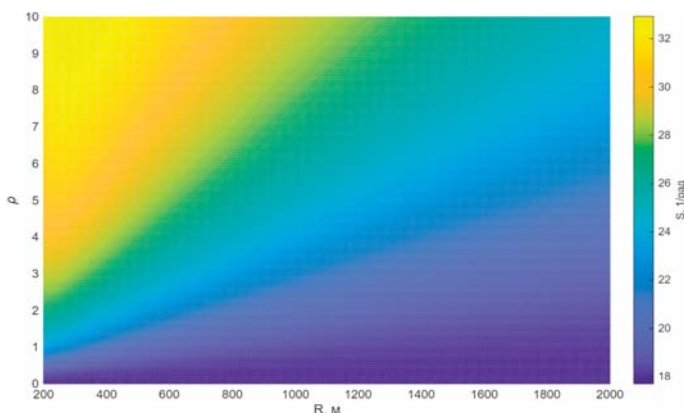


Рис. 13. Крутизна дискриминационной характеристики в зависимости от R и ρ

Согласно рис. 13, крутизна дискриминационной характеристики демонстрирует прямую зависимость от коэффициента усиления когерентной помехи ρ и обратную – от дальности R . Эта тенденция согласуется с ранее представленными результатами. Из указанной зависимости следует, что при уменьшении дальности до цели R требуемое значение коэффициента усиления когерентной помехи снижается ρ .

Выводы

В ходе исследования влияния двухточечной когерентной помехи на изменение дискриминационной характеристики было определено:

1) При приближении разности фазы когерентной помехи к 180° наблюдается наибольшее смещение дискриминационной характеристики вправо вдоль оси абсцисс. Одновременное увеличение коэффициента усиления когерентной помехи приводит к дополнительному смещению характеристики и изменению её крутизны;

2) Изменением коэффициента усиления когерентной помехи и амплитудного соотношения можно добиться двукратного изменения крутизны дискриминационной характеристики по сравнению со случаем отсутствия помехи;

3) Крутизна дискриминационной характеристики увеличивается по мере того, как нормаль к базе самолёта-постановщика становится соосной линии визирования пеленгатора;

4) Наибольшая крутизна дискриминационной характеристики наблюдается при приближении значения разности фазы когерентной помехи к 180° ,

5) Сокращение дальности между пеленгатором и самолётом-постановщиком приводит к увеличению крутизны дискриминационной характеристики при меньшем усилении когерентной помехи;

В рамках представленной работы не учитывалось изменение частоты эхо-сигнала и когерентной помехи, обусловленное относительным движением пеленгатора и самолёта-постановщика. Также было принято допущение о равенстве несущих частот эхо-сигнала и когерентной помехи. Эффект воздействия когерентной помехи на пеленгатор при данных обстоятельствах требует отдельного рассмотрения.

Требуется проведение отдельного исследования, направленного на изучение особенностей постановки двухточечной когерентной помехи в отношении пеленгатора, включённого в контур автоматического сопровождения по направлению.

В статье амплитуды эхо-сигнала и сигнала постановщика когерентной помехи являются относительными величинами. Их абсолютные значения определяются рядом факторов: параметрами передатчика и антенны пеленгатора, эффективной площадью отражения самолёта-постановщика, коэффициентом усиления постановщика помехи. Расчёт указанных амплитуд возможен на основе уравнения дальности радиолокации.

Статья может оказаться полезной при исследовании влияния двухточечной когерентной помехи на коэффициент передачи пеленгатора в составе замкнутого контура автоматического сопровождения по направлению.

Литература

1. Максимов М.В., Горгонов Г.И. Радиоэлектронные системы наведения. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
2. Вейцель В.А., Волковский А.С., Волковский С.А. и др. Радиосистемы управления: учеб. Для вузов; под ред. В.А. Вейцеля. М.: Дрофа, 2005. 416 с.
3. Леонов А.И., Фомичёв К.И. Моноимпульсная радиолокация. М., изд-во «Советское радио», 1970, 392 с.
4. Леонов А.И., Фомичёв К.И. Моноимпульсная радиолокация. 2-е изд., перераб и доп. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.

5. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов вузов ВВС. Под ред. П.И. Дудника. М.: Изд. ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
6. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника. Пер. С англ. Под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Москва: Техносфера, 2014.
7. Sherman S.M. Barton D.K. Monopulse Principles and Techniques, Second Edition. Norwood, MA: Artech House, 2011.
8. Budge Jr. M.C., German S.R. Basic Radar Analysis, Norwood, MA: Artech House, 2015.
9. Budge Jr. M.C., German S.R. Basic Radar Tracking, Artech House, 2019.
10. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2005.
11. Hansen R.C. Phased Array Antennas. Second Edition. Artech House, 2009.
12. Вищукаев А.В., Димура А.В., Фролов А.Ю. Измерение координат цели на фоне помех с использованием информации радиотехнической разведки // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 12. С. 91-97. EDN: BMLWYL
13. Вовшин Б.М., Пушков А.А., Патрацкая А.Д., Спиридонов Б.С., Вылегжанин И.С. Двухканальные угловые измерители в условиях амплитудных неидентичностей каналов // Вестник воздушно-космической обороны. 2025. № 4 (48). С. 67-73. EDN: YJAQML
14. Ашихмин А.В., Егорова Е.Д., Ищенко Е.А., Фёдоров С.М. Разработка широкополосного моноимпульсного радиопеленгатора на основе SDR-радио // Теория и техника радиосвязи. 2024. № 3. С. 22-28. EDN: SQEMEA
15. Попов А.С., Пименов В.Ф. Моделирование моноимпульсного фазового пеленгатора повышенной точности на основе адаптивной антенной решётки // Известия вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66. № 4. С. 262-275. EDN: IWSQCH
16. Курбатский С.А., Хомяков Д.А., Ростовцев И.А. Статистические характеристики углового шума в моноимпульсном пеленгаторе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 81-84. EDN: QAHAGT
17. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. М.: Советское радио, 1968, 448 с.
18. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием/ Под. Ред. Ю.М. Перунова. Изд. 2-е, испр. и дополн. М.: Радиотехника, 2008. 416 с.
19. Курпиров А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
20. Van Brunt. Applied ECM/E.W. Engineering, USA, 1978, v. 1.
21. Dr. T.W. Tucker, Bill Vidger. "Cross-eye Jamming Effectiveness" – Tactical Technologies Inc, 2009.
22. Pieterse F., du Plessis W.P. Implementation and Testing of a Retrodirective Cross-Eye Jammer // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 58, no. 5, pp. 4486–4494, Oct. 2022. Extended Analysis of Retrodirective Cross-Eye Jamming.
23. Лось А.П., Авраменко А.Я. Математическая модель уводящей когерентной помехи по протяженной и точечной цели. В книге: Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации. Сборник докладов Шестой Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 88-90. EDN: PMWAWI
24. Баринев С.П., Маевский Ю.И., Прудников Д.И. Вероятностные характеристики функционирования РЛС с моноимпульсным пеленгатором в условиях частично когерентных помех // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 11. С. 124-130. EDN: AGGOVB
25. Подстригаев А.С., Бондарев Д.В., Николайцев Н.А., Гордеев Д.А., Заринов А.Э. Оценка искажения эффективных секторов постановки когерентной помехи радиолокатору с учетом размещения постановщика помех на авиационном носителе // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 9. С. 145-154. EDN: TELETL
26. Бондарев Д.В., Калинин Д.А., Подстригаев А.С. Способ обнаружения когерентной помехи в радиолокационных системах // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны (им. Маршала Советского Союза Л.А. Говорова. 2025. № 1 (30). С. 4-10. EDN: CQEERD
27. Харалгин С.В. Исследование поляризационной неидентичности формируемого поля при создании когерентных помех самолетной станцией РЭБ // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 5. С. 100-113. EDN: WKXPCE
28. Юдин В.Н., Савченко Д.А. Оценка помехозащитной эффективности адаптивной антенной решетки при действии двухточечной когерентной помехи // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69. № 8. С. 792-801. EDN: HOBKOO
29. Калябин Е.В. Применение алгоритма разнесения фаз при постановке когерентных помех моноимпульсной радиолокационной станцией // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 5. С. 77-85. EDN: LOFOMW
30. Zehao Wang, Xiaolong Su, Panhe Hu, Tianpeng Liu, Haobin Sun, Zhen Liu. Cross-eye jamming method based on 1-bit digital coding metasurface // iScience, 2025 Aug 6;28(9):113313. DOI: 10.1016/j.isci.2025.113313.
31. Axel Bennarsten. Cross-eye jamming simulation for a modern radar system. Department of Biomedical Engineering Lund University, June 2025. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9168952>.
32. Dong Li, Yongcai Liu, Liang Zhou, Binbin Su. Platform echo and cross-eye jamming against active-passive composite monopulse radars, IET 'Radar, Sonar & Navigation September 2024 18(11):2134-2143, DOI:10.1049/rsn2.12636.
33. Vittorio Calligaris, Pierfrancesco Lombardo. Tolerance Analysis and Robustness of Phase Conjugating Cross-Eye Jamming. IET Radar, Sonar & Navigation, July 2025 19(1), DOI:10.1049/rsn2.70050.
34. Устройства СВЧ и антенн / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, испр. и доп. М.: Радиотехника, 2016. 560 с.
35. Защита от радиопомех. Под. ред. Максимова М.В. М.: Сов. Радио, 1976, 496 с.

EFFECT OF SIMULTANEOUS CROSS-EYE JAMMING AND TARGET ECHO ON THE MONOPULSE DISCRIMINATION CHARACTERISTIC

Yury V. Kuznetsov, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, kuznetsovvy@mai.ru

Andrey B. Baev, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, baev@mai.ru

Ruslan O. Egorychev, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, roegorychev@mai.education

Abstract

The monopulse amplitude sum-and-difference direction finder (hereafter, the direction finder) is widely used in angular tracking systems that form part of aircraft weapon systems. Electronic countermeasures are employed to protect aircraft against such weapon systems; they degrade the direction finder's ability to determine the spatial position of the aircraft. This paper considers a scenario in which two-point coherent (cross-eye) jamming is directed at an active direction finder by an electronic countermeasure system carried on board the protected aircraft. The effect of two-point coherent jamming on the direction finder can be assessed through the resulting change in its direction-finding characteristic. This change takes two principal forms: a shift of the equisignal direction of the characteristic and a change in the slope of its linear segment. To investigate this change, the paper presents a direction-finder model that accounts for several key parameters: the relative geometry of the direction finder and the protected jamming aircraft (including the distance between them and their orientation); the amplitudes of the echo signal and the coherent jamming; the phase difference between the signals radiated by the two spatially separated antennas of the electronic countermeasure system that generates the coherent jamming; the baseline length of the aircraft that deploys the two-point coherent jamming. A key feature of the model is that the two-point coherent jamming is applied to the direction finder while its echo signal is simultaneously received. The paper also derives the expressions describing the reception of the additive mixture of the echo signal and the coherent jamming, taking the above parameters into account; these expressions form the basis of the proposed model.

Keywords: Self-aircraft protection, electronic countermeasures, coherent jamming, cross-eye jamming; monopulse direction finder; direction-finding characteristic

References

- [1] M.V. Maksimov, G.I. Gorgonov, "Radio-electronic guidance systems," Moscow: Radio and Communications, 1982. 304 p.
- [2] V.A. Weitzel, A.S. Volkovsky, S.A. Volkovsky et al., "Radio control systems," textbook. For universities; edited by V.A. Weitzel. Moscow: Bustard, 2005. 416 p.
- [3] A.I. Leonov, K.I. Fomichev, "Monopulse radar," Moscow: Soviet Radio", 1970, 392 p.
- [4] A.I. Leonov, K.I. Fomichev, "Monopulse rada," 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Radio and Communications, 1984. 312 p.
- [5] P.I. Dudnik, G.S. Kondratenkov, B.G. Tatarsky, A.R. Ilchuk, A.A. Gerasimov, "Aviation radar complexes and systems: a textbook for students and cadets of Air Force universities," Edited by P.I. Dudnik. Moscow: VVIA Publishing House. Professor N.E. Zhukovsky, 2006/ 1112 p.
- [6] "Handbook of radar," Edited by M.I. Skolnik. Under the general editorship of V.S. Verba. In 2 books, Moscow: Technosphere, 2014.
- [7] S.M. Sherman and D.K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques," Second Edition. Norwood, MA: Artech House, 2011.
- [8] M.C. Budge Jr. and S.R. German, "Basic Radar Analysis," Norwood, MA: Artech House, 2015.
- [9] M.C. Budge Jr. And S.R. German, "Basic Radar Tracking," Artech House, 2019.
- [10] R.J. Mailloux, "Phased Array Antenna Handbook," 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [11] Phased Array Antennas. Second Edition. R.C. Hansen. Artech House, 2009.
- [12] A.V. Vitsukaev, A.V. Dimura, A.Yu. Frolov, "Measuring the coordinates of a target against a background of interference using electronic intelligence information," Moscow: Radio engineering. 2025. Vol. 89. No. 12, pp. 91-97.
- [13] B.M. Vovshin, A.A. Pushkov, A.D. Patraskaya, B.S. Spiridonov, I.S. Vylegzhanin, "Two-channel angular discriminators in conditions of channel amplitude non-identity," *Bulletin of Aerospace Defense*. 2025. No. 4 (48), pp. 67-73.
- [14] A.V. Ashikhmin, E.D. Egorova, E.A. Ishchenko, S.M. Fedorov, "Development of a wideband monopulse radio direction finder based on SDR radio," *Theory and technology of radio communications*. 2024. No. 3, pp. 22-28.
- [15] A.S. Popov, V.F. Pimenov, "Simulation of an improved-accuracy monopulse phase direction finder based on an adaptive antenna array," *Izvestiya vuzov. Radiophysics*. 2023. Vol. 66. No. 4, pp. 262-275.
- [16] S.A. Kurbatskiy, D.A. Khomyakov, I.A. Rostovtsev, "Statistical characteristics of angular noise in a monopulse direction finder," *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2023. No. 11. pp. 81-84.
- [17] S.A. Vakin, L.N. Shustov, "Fundamentals of radio countermeasures and electronic intelligence," Moscow: Publishing house "Soviet Radio", 1968, 448 p.
- [18] Yu.M. Perunov, K.I. Fomichev, L.M. Yudin, "Radio electronic suppression of information channels of weapons control systems," Edited by Yu.M. Perunov. 2nd Ed., revised and supplemented. Moscow: Radio Engineering, 2008. 416 p.
- [19] A.I. Kupriyanov, L.N. Shustov, "Electronic warfare. Fundamentals of theory," Moscow: Vuzovskaya kniga, 2011. 800 p.
- [20] Van Brunt, "Applied ECM/E.W." Engineering, USA, 1978, v. 1.
- [21] Dr. T.W. Tucker, Bill Vidger "Cross-eye Jamming Effectiveness" - Tactical Technologies Inc, 2009.
- [22] F. Pieterse and W.P. du Plessis, "Implementation and Testing of a Retrodirective Cross-Eye Jammer," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 4486-4494, Oct. 2022. Extended Analysis of Retrodirective Cross-Eye Jamming.
- [23] A.P. Los, A.Ya. Avramenko, "Mathematical model of diverting coherent interference on extended and point target. In the book: Radio engineering, optical and biotechnical systems," *Devices and methods of information processing. Collection of reports of the Sixth All-Russian Scientific Conference*. Saint Petersburg, 2025. pp. 88-90.

- [24] S.P. Barinov, Yu.I. Maevsky, D.I. Prudnikov, "Probabilistic characteristic of radar with monopulse direction finder in partially-coherent interference environment," *Radio engineering*. 2025. Vol. 89. No. 11. pp. 124-130.
- [25] A.S. Podstrigaev, D.V. Bondarev, N.A. Nikolaytsev, D.A. Gordeev, A.E. Zaripov, "Estimation of distortion of effective sectors of cross-eye jamming to radar taking into account the placement of the jammer on an aircraft carrier," *Radio Engineering*. 2025. Vol. 89. No. 9. pp. 145-154.
- [26] D.V. Bondarev, D.A. Kalinin, A.S. Podstrigaev, "Method to detect coherent interference in radar systems," *Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense named after Marshal of the Soviet Union Govorov L.A.* 2025. № 1 (30), pp. 4-10.
- [27] S.V. Kharalgin, "Investigation of the polarization difference of the EM wave of an airborne EW system in the mode of coherent interference," *Radio Engineering* 2024. Vol. 88. No. 5, pp. 100-113.
- [28] V.N. Yudin, D.A. Savchenko, "Evaluation of the interference protection efficiency of an adaptive antenna array under the action of two-point coherent interference," *Radio engineering and electronics*. 2024. Vol. 69. No. 8, pp. 792-801.
- [29] E.V. Kalyabin, "Application of the phase separation algorithm for the production of coherent interference by monopulse radar," *Radio Engineering*, 2023. Vol. 87. No. 5, pp. 77-85.
- [30] Zehao Wang, Xiaolong Su, Panhe Hu, Tianpeng Liu, Haobin Sun, and Zhen Liu, "Cross-eye jamming method based on 1-bit digital coding metasurface", *iScience*, 2025 Aug 6;28(9):113313. DOI: 10.1016/j.isci.2025.113313.
- [31] Axel Bennarsten, "Cross-eye jamming simulation for a modern radar system", Department of Biomedical Engineering Lund University, June 2025. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9168952>.
- [32] Dong Li, Yongcai Liu, Liang Zhou, Binbin Su, "Platform echo and cross-eye jamming against active?passive composite monopulse radars", *IET 'Radar, Sonar & Navigation* September 2024 18(11):2134-2143, DOI:10.1049/rsn2.12636.
- [33] Vittorio Calligaris (Sapienza University of Rome), Pierfrancesco Lombardo (Sapienza University of Rome), "Tolerance Analysis and Robustness of Phase Conjugating Cross?Eye Jamming", *IET Radar, Sonar & Navigation*, July 202519(1), DOI:10.1049/rsn2.70050;
- [34] Microwave and antenna devices / Edited by D.I. Voskresensky. 4th Ed. Moscow: Radio Engineering, 2016. 560 p.
- [35] Protection from radio interference. Ed. Maksimova M.V., Moscow: Sov. Radio, 1976, 496 p.

Information about authors:

Yury V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng.) (2005), Professor (2007), Head of the Department of Theoretical Radio Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2012); Honored Worker of Higher School of the Russian Federation (2020), Moscow Russia. <https://orcid.org/0000-0003-1194-3445>

Andrey B. Baev, Cand. Sci. (Eng.) (2002), Associate Professor (2007), Associate Professor and a head of R&D Department on the Theoretical Radio Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow Russia. <https://orcid.org/0000-0003-3829-1379>

Ruslan O. Egorychev, PhD student, Department of Theoretical Radio Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow Russia.

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ОБУЧАЮЩЕГО НАБОРА ДАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СЕТЕВОГО ТРАФИКА В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-36-44

Manuscript received 08 April 2026;

Accepted 10 June 2026

Лебедев Илья Сергеевич,Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия,
isl_box@mail.ruИсследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 25-21-00269, <https://rscf.ru/project/25-21-00269/>**Сухопаров Михаил Евгеньевич,**Государственный университет морского и речного флота имени
адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия,
mail@sukhoparovm.ru**Ключевые слова:** сетевой трафик, временные ряды,
классификация состояний, автоматическое
формирование объектов, машинное обучение

В статье представлен метод автоматического формирования объектов наблюдения временных рядов сетевого трафика для классификации состояний информационно-телекоммуникационных систем. Рост объемов данных сетевого трафика, неоднозначность проявления различных событий функционирования информационных систем, высокая сложность и трудоемкость процессов разметки обуславливает необходимость разработки адаптивных методов обработки данных. В отличие от классических подходов, в предлагаемом методе происходит не настройка и оптимизация модели на выборке данных, а, наоборот, объекты наблюдения формируются из последовательности "под модель". Предлагаемый метод автоматически генерирует обучающие выборки путём автоматического разбиения исходных последовательностей на патчи (подпоследовательности) с варьируемыми длиной и сдвигом. Из них формируются выборки данных. На каждой итерации, на полученных выборках, происходит обучение, оценка достигаемых показателей качества и выбор параметров патчей и моделей, которые достигают лучших результатов. Проведён эксперимент на синтетическом наборе данных для бинарной классификации состояния системы. Показано, что применение сдвига в последовательности улучшает обобщающую способность за счёт аугментации данных, а оптимальный размер патча балансирует информативность и уровень шума. Предложенный метод автоматизирует подготовку данных и позволяет выбирать оптимальные параметры формирования патчей, повышает различимость классов, может использоваться как метод аугментации данных для улучшения обучения моделей, даёт возможность применять менее ресурсоёмкие модели для обработки сложных структур данных. Метод позволяет повысить качество классификации в среднем на 2-8%, снизить вычислительные затраты, повысить интерпретируемость и эффективно обрабатывать сложные структуры данных.

Информация об авторах:**Лебедев Илья Сергеевич**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, лаборатория интеллектуальных систем, СПИИРАН, СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0001-6753-2181**Сухопаров Михаил Евгеньевич**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи на морском флоте, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0003-1798-8257**Для цитирования:**

Лебедев И.С., Сухопаров М.Е. Метод автоматического формирования и выделения объектов наблюдения во временных рядах сетевого трафика в задаче классификации состояния системы // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 36-44.

For citation:Lebedev I.S., Sukhoparov M.E. "A method for automatic formation and selection of observation objects in network traffic time series in system state classification problem", *T-Comm*, 2026, vol. 20, no.7, pp. 36-44. (in Russian)

Введение

Повсеместное использование технологий сбора и хранения данных сетевого трафика способствует накоплению большого объема временных рядов и информационных последовательностей. Их разметка является сложным, трудоемким процессом, в котором выделение отдельных событий может трактоваться по-разному [1, 2]. В связи с этим, особую актуальность приобретает задача разработки эффективных моделей для прогнозирования поведения систем, состояния сетевых устройств и каналов передачи данных.

Возникающие колебания интенсивности сетевого трафика, динамически изменяющиеся характеристики входных данных, проявление "дрейфа концепта" обуславливают необходимость развития адаптивных самонастраивающихся методов обработки данных [3, 4].

При этом применение таких подходов требует автоматической обработки данных, выявления информативных признаков, что приводит к решениям, опирающимся, например, на методы AutoML. Они направлены на оптимизацию гиперпараметров моделей, динамических настроек обрабатываемых алгоритмов, поиск оптимизированных конфигураций [5, 6]. Однако высокие ресурсные требования, сложность отладки "черного ящика", риск переобучения и ложной оптимизации, зависимость от качества данных может являться существенным ограничением данной технологии [7, 8].

В связи с этим актуальной становится задача предварительного формирования и оценки входной выборки, с учётом выявленных свойств данных и последующего построения моделей обработки, демонстрирующих наилучшие качественные показатели применительно к характеристикам каждой выделенной подпоследовательности [9].

Цель работы – разработать метод автоматического формирования и выделения объектов наблюдения в данных временных рядов сетевого трафика для классификации состояний информационно-телекоммуникационных систем, позволяющий снизить трудоёмкость подготовки данных и повысить качество классификации.

Автоматическое формирование обучающих выборок путём разбиения исходных последовательностей сетевого трафика на патчи с варьируемыми длиной и сдвигом, а также последующий выбор оптимальных параметров патчей и моделей на основе оценки функционала качества могут позволить повысить различимость классов состояний системы, улучшить обобщающую способность моделей за счёт аугментации данных, снизить вычислительные затраты за счёт выбора менее ресурсоёмких моделей, подходящих для конкретных характеристик патчей, повысить интерпретируемость результатов классификации.

Научная новизна работы заключается в том, что предлагается решение обратной задачи к обработке временных рядов сетевого трафика, где вместо настройки модели под данные осуществляется формирование объектов наблюдения и автоматическая оптимизация их параметров «под модель». Кроме того, формирование патчей со сдвигом может рассматриваться как метод аугментации данных, улучшающий обобщающую способность моделей.

Практическая значимость состоит в том, что предлагаемый метод дает возможность автоматизации трудоёмкого процесса разметки данных сетевого трафика, позволяет выбирать оптимальные параметры формирования патчей для

конкретных моделей обработки и позволяет применять менее ресурсоёмкие модели для обработки сложных структур данных без потери качества классификации.

1 Обзор существующих методов

Анализ временных рядов сетевого трафика является одной из основных задач для мониторинга и классификации состояний информационно-телекоммуникационных систем. Ее решение базируется на применении методов машинного обучения таким образом, чтобы оптимизировать модель под конкретные свойства последовательности трафика. Процесс оптимизации предполагает два направления: улучшение качества входных данных и построение эффективной модели обработки [10, 11].

Для повышения качества данных сетевого трафика используют методы формирования пространства признаков, кластеризацию, поиск точек разладки временных рядов и обнаружение «дрейфа концепта». Выявление точек изменения свойств предикторов и целевых переменных критично для задач анализа и обработки трафика. Здесь применяют байесовский анализ, метод максимального правдоподобия, квантильную регрессию и другие подходы. Но из-за сложности аппроксимирующих функций такие методы требуют больших вычислительных ресурсов [12-14].

При работе с временными рядами сетевого трафика важно выделять сегменты с устойчивыми характеристиками и отслеживать закономерности их изменений. Сегментация, по сути, заключается в разработке детектора, фиксирующего моменты смены свойств ряда.

Во многих исследованиях процессы разбиения выборки в задачах машинного обучения рассматриваются как вспомогательные и анализируются преимущественно в контексте решения узкоспециализированных задач. Выбор методов и их эффективность в значительной степени определяются типом и характеристиками обрабатываемых данных [15].

При работе с информационными последовательностями сетевого трафика отмечают несколько ключевых направлений. Классические методы кластеризации используются для обработки временных рядов, что улучшает качество данных, обладающих определёнными свойствами. В условиях высокой размерности, где имеется более одной точки изменения, применяется сегментация данных с использованием методов динамического программирования, бинарной сегментации и байесовских подходов [16, 17]. Байесовские методы для регрессионных моделей с точками изменения, как показано в работах, имеют высокую вычислительную сложность и требуют много итераций. Другие подходы используют статистические пороги для сегментации и учитывают выбросы и шумы в данных.

Эффективность применения различных подходов глубокого обучения зависит от вычислительных ресурсов, выделения и анализа сегментов сетевого трафика [18, 19]. Применение методов расширенного теста Дики-Фуллера для проверки стационарности, оценки максимального правдоподобия, предлагают различные способы выявления точек изменений. Однако у всех этих методов есть общие недостатки: сложность обучения, высокая ресурсоёмкость и риск некорректного выбора моделей, что может ухудшить прогноз [20, 21].

Анализ существующих методов выявляет ряд проблемных вопросов задач классификации состояний информационно-телекоммуникационных систем. Большинство методов требуют значительных вычислительных ресурсов, огромного объема качественно размеченных наборов данных. Однако динамически меняющиеся характеристики сетевого трафика, неоднозначность трактовки событий, появления новых типов аномалий не всегда, проявление внешних воздействий позволяют добиться приемлемого качества. Кроме того, некачественная разметка может приводить возникновению риска переобучения.

В связи с этим возникает задача оценки входной выборки, её сегментации с учётом свойств данных, а также формирования моделей обработки, обеспечивающих наилучшие качественные показатели для выявленных характеристик анализируемой последовательности.

Таким образом, необходим адаптивный метод, который автоматически формирует обучающие выборки с учётом свойств данных, минимизирует требования к разметке, обеспечивает интерпретируемость результатов, а также обеспечивает аугментацию данных для улучшения обобщающей способности. Предлагаемый в работе метод направлен на решение этих задач за счёт автоматического формирования объектов наблюдения с оптимизацией их параметров под конкретную модель обработки.

2 Предлагаемый метод

Функционирование различных систем сопряжено с необходимостью определения их текущего состояния. Анализ временных рядов сетевого трафика широко применяется в системах мониторинга информационно-телекоммуникационных сетей, где решается задача классификация подпоследовательностей. Она состоит в отнесении отдельных элементов временного ряда к определённым состояниям, таким как «рабочее», «предотказное» или «неработоспособное», выявления аномалий в сетевом трафике путём анализа характеристик пакетов, интервалов между их поступлениями, направления передачи последовательности и других показателей.

Однако накопленный значительный объем исследуемых последовательностей, необходимость анализа большого количества характеристик, наличие неявных закономерностей обуславливает необходимость создания и применения сложных моделей обработки. Кроме того, возникает ряд проблемных вопросов, связанных с трудоемкостью процессов разметки данных.

Решение задачи классификации состояния на основе автоматического выделения репрезентативных фрагментов из информационных последовательностей временных рядов сетевого трафика.

В рассматриваемом случае автоматическая разметка данных основывается на разделении последовательностей на патчи, содержащие различное количество отсчетов. Формирование патчей разной длины может «захватить» значимую информацию, сократить длину последовательности и уменьшить вычислительную сложность. В случаях периодичности в данных выбор оптимального размера подпоследовательности позволяет моделям изучать более длинные временные интервалы, что может повысить качество прогнозов. Однако

выбор размера патча и его свойств должен зависеть от конкретной задачи и характеристик данных.

Классификация состояния системы является одной из важных задач при идентификации неисправностей техники, мониторинге состояния киберфизических систем, обнаружения аномалий в трафике. В результате возникает задача, в которой необходимо определить, к какому состоянию относится элемент временного ряда на основе анализа данных, полученных через определённые промежутки времени. Формальная постановка будет выглядеть следующим образом.

Имеется множество состояний $\{c_1, \dots, c_n\} \in C$ информационной системы. В каждом состоянии c_j получен временной ряд сетевого трафика $X^{(c_j)} = \{x_{t_i}^{(c_j)}\}_{t=1}^T$.

Он разбивается на патчи $p_i = \{x_{t_i}^{(c_j)}, x_{t_{i+1}}^{(c_j)}, \dots, x_{t_{i+w-1}}^{(c_j)}\}$, и, в зависимости в каком состоянии был получен, ему ставится соответствующая метка c_j .

Получается обучающее множество патчей $P^\theta = \{p_i^{(c_j)}\}_{i=1}^N$, характеризующееся параметрами $\theta = (w, s)$ длины и сдвига. Меняя эти параметры в автоматическом режиме, можно формировать различные обучающие выборки для моделей обучения.

Для обработки обучающей выборки определяется ряд моделей обработки $\{a_1, \dots, a_K\} \in A$.

Необходимо определить множество P и параметры его формирования (длина окна, сдвиг), назначить модель обработки $a_k \in A$ имеющей лучшее значение функционала качества

$$Q(a_k(p_i^{(c_j)}, P^\theta), C) \rightarrow \max_{a_k \in A, \theta \in \Theta} \quad (1)$$

Таким образом, выбор параметров на основе выражения (1) формулируется как задача дискретной оптимизации:

$$(\theta^*, a^*) = \arg \max_{a_k \in A, \theta \in \Theta} Q(a_k(p_i^{(c_j)}, P^\theta), C) \quad (2)$$

Особенностью предлагаемого метода, описанного выражениями (1) и (2), является автоматический выбор и формирование объектов наблюдения из данных для повышения качества моделей обработки. В отличие от традиционных подходов, рассматривается обратная задача. Не модель настраивается и оптимизируется на выборке данных, а, наоборот, объекты наблюдения формируются из данных «под модель». Критерием оценки являются значения функционала качества.

Обработка данных с использованием предлагаемого подхода проходит несколько этапов. Сначала выбираются базовые алгоритмы обработки. Из последовательностей создаются объекты наблюдения и формируются множества обучающих выборок данных. Причем на каждой итерации изменяются свойства создаваемых объектов, например, длина и сдвиг. Затем проводится анализ значений выбранного показателя качества заранее определенных моделей на всех выборках данных. После этого выбирается метод формирования объектов наблюдения и назначается «лучшая» модель.

На рисунке 1 представлена Алгоритмическая последовательность шагов метода формирования и анализа выборок данных.

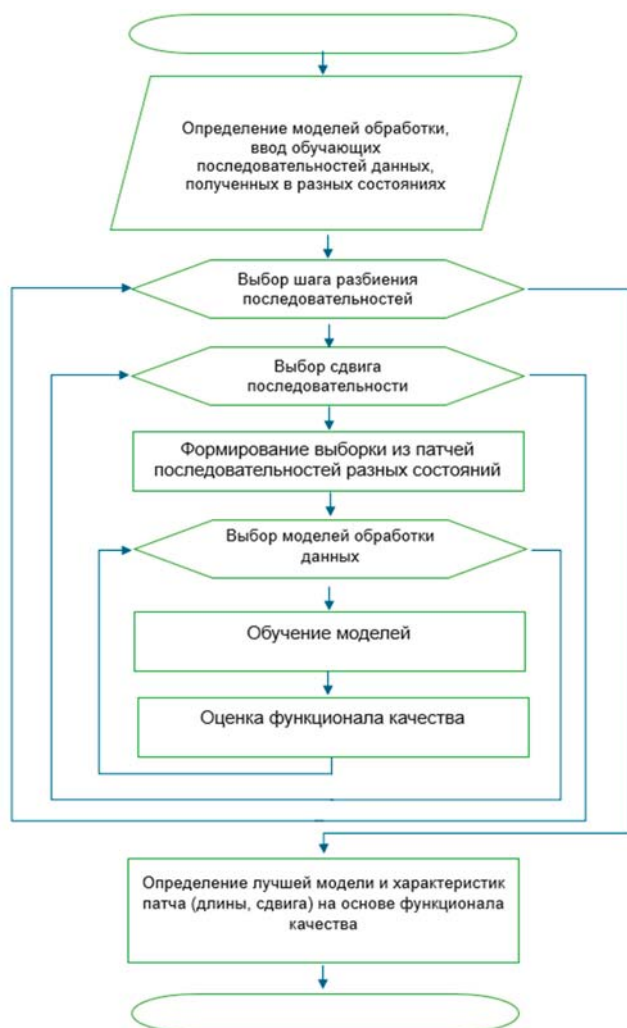


Рис. 1. Алгоритмическая последовательность шагов метода формирования и анализа выборок данных

Предлагаемый метод включает следующую последовательность действий. Вначале задается пул моделей обработки. Определяются исходные информационные последовательности, полученные в различных состояниях системы. Затем происходит циклический перебор длины и сдвига для формирования патчей в результате которого автоматически изменяются свойства объектов. Меняется длина разбиения и сдвиг одной последовательности относительно другой. Образуется обучающая выборка, содержащая набор патчей одинакового размера, каждый из которых помечен классом, соответствующим состоянию системы.

Выборка поочередно подается на вход отобранных моделей. Осуществляется процесс обучения. Для каждой модели и выборки, содержащей патчи, характеризующиеся длиной и сдвигом, определяется значение выбранного функционала качества. Далее происходит повторение процессов формирования выборок для других значений сдвига и шага разбиения, обучения моделей, вычисления значений функционала качества.

По окончании перебора определяются параметры длины и сдвига патча для формирования выборки и модель, достигающая лучших значений выбранного показателя качества. Псевдокод предлагаемого метода представлен на рисунке 2.

Вход:

временные ряды $X^{(c)}$;
пул моделей $\{a_1, \dots, a_k\} \in A$;
диапазоны параметров w, s
метрика качества Q .

Выход:

оптимальные параметры w^*, s^* ,
лучшая модель a_k^* , обученная на выборке P^B .

Начало

```

for w in [1, w_max]:
  for s in [1, w]:
     $P^B \leftarrow \text{сформировать\_патчи}(X^{(c)}, w, s)$ 
    for  $a_k$  in A:
       $a_k.\text{обучить}(P^B_{\text{train}})$ 
       $Q_{\text{val}} \leftarrow \text{оценить\_качество}(a_k, P^B_{\text{test}})$ 
      сохранить ( $w, s, a_k, Q_{\text{val}}$ )
    ( $w^*, s^*, a_k^*$ )  $\leftarrow \text{argmax}(Q_{\text{val}})$ 
     $a_k^*.\text{обучить}(P^B_{\text{full}})$ 
  
```

Конец

Рис. 2. Псевдокод предлагаемого метода

Предложенный подход направлен на реализацию самоорганизующихся самообучающихся систем машинного обучения. На вход системы поступают помеченные последовательности временных рядов сетевого трафика, из которых в автоматическом режиме создаются объекты наблюдения с разными свойствами и формируются выборки данных. Далее решается задача обучения с учителем, оцениваются достигаемые значения функционала качества на каждой выборке и определяются свойства объектов наблюдения и модели, где достигнуты лучшие значения показателей качества.

Таким образом, предлагаемый метод автоматизирует формирование и выбор патчей на основе анализа качественных показателей моделей, что позволяет выбирать модели и способы формирования обучающих последовательностей для достижения лучших результатов.

Эффективность применения метода, описанного в статье, напрямую зависит от соблюдения ряда условий. Качество обработки информационных последовательностей моделями определяется их свойствами. В ходе формирования объектов наблюдения необходимо выбирать размер патча таким образом, чтобы в нем содержались информативные признаки. Для успешного применения предлагаемого метода анализируемые последовательности должны обладать различными паттернами или свойствами. При этом формируемые векторы объектов наблюдения обязаны включать признаки, коррелирующие с целевой переменной, описывающей состояние. Хотя большинство моделей обработки могут обнаруживать такую информацию на основе фактических значений, тем не менее для повышения качества в ряде случаев при обработке патчей временных рядов целесообразно добавлять статистическую информацию [22]. Требуемыми характеристиками для нее является простота вычислений, нечувствительность к преобразованиям и результирующая производительность.

3 Эксперимент

В рамках эксперимента исследовалась возможность автоматического формирования выборок данных из информационных последовательностей для оценки состояния. Рассматриваемые значения иллюстрирующих обработку данных предлагаемым методом получены синтетическим методом.

Основная цель заключалась в анализе влияния свойств объектов наблюдения и получаемых из них выборок данных на качественные показатели моделей. Самоорганизующаяся самообучающаяся модель получала на вход временные ряды сетевого трафика, полученные в различных состояниях. Пример таких рядов представлен на рисунке 3. Из них изменением длины и сдвига формировались объекты наблюдения, из которых формировались выборки данных. Затем они подавались на вход моделям обучения и происходила оценка достигаемых показателей качества.

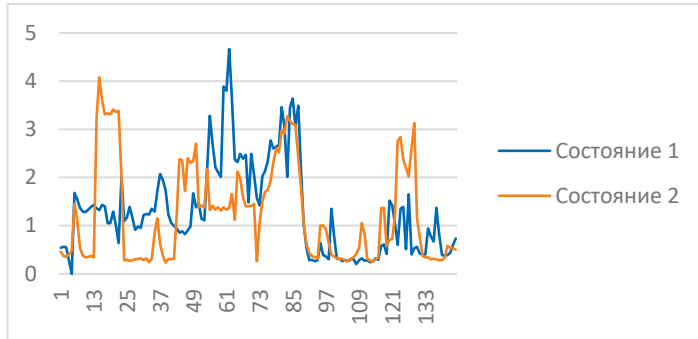


Рис. 3. Последовательности различных состояний

В ходе эксперимента при оценке достигаемых показателей качества моделей учитывались ресурсные ограничения. Проводилось обучение и оценка качественных показателей моделей рекуррентной нейронной сети с долговременной кратковременной памятью LSTM (архитектура: 2 слоя LSTM (50 нейронов), полносвязный слой (10 нейронов), выходной слой (2 нейрона); функция активации: ReLU; оптимизатор: Adam (learning rate=0,001); epochs: 50; batch size: 32), рекуррентной нейронной сети RNN (архитектура: 1 слой RNN (30 нейронов), полносвязный слой (10 нейронов), выходной слой (2 нейрона); функция активации: tanh; оптимизатор: SGD (learning rate=0,01); epochs: 50; batch size: 32) и метода kNN-DTW (k=5; метрика расстояния: DTW с ограничением окна (radius=10)).

В качестве оцениваемых значений определялись точность (accuracy), точность (precision), полнота, F-мера:

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3)$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$F1 = \frac{2 \times precision \times recall}{precision + recall} \quad (6)$$

Оценка эффективности предлагаемого метода проводилась при решении задачи бинарной классификации, где сетевой трафик рассматривался в двух состояниях «нормальное» и «аномальное». Сформированные выборки разделялись на обучающую и тестовую части в соотношения 90:10. Длина объектов наблюдения, представленных подпоследовательностями, варьировалась в диапазоне от 2 до 17 отсчетов, а количество сдвигов для каждой длины соответствовало самой этой длине.

На рисунке 4 показано значение accuracy (3) для выбранных классифицирующих моделей обработки данных.

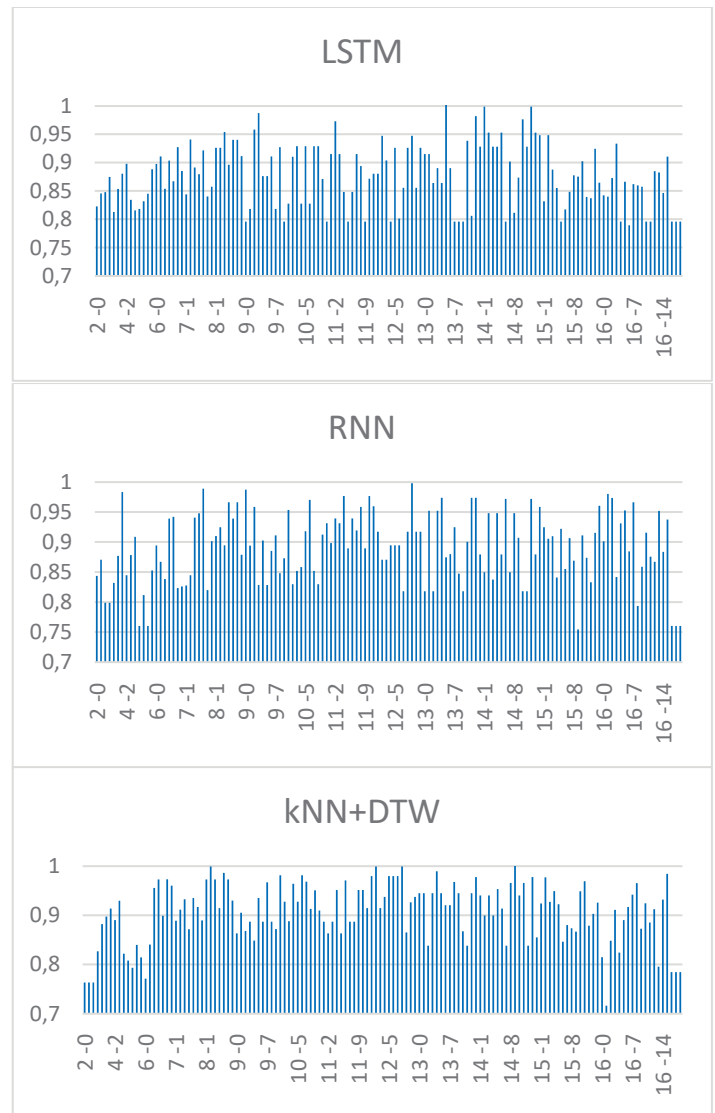


Рис. 4. Значения accuracy (ось ординат) по совмещенной оси «длина патча-сдвиг» (ось абсцисс)

Графики рисунка 3 показывают влияние значений длины и сдвига при формировании объектов наблюдения временных рядов сетевого трафика на достигаемые показатели accuracy. На одной и той же длине при разном сдвиге могут получаться разные значения точности.

На рисунке 5 приведены лучшие значения (2) accuracy (3) для выбранных моделей, указаны длина и сдвиг патча на которых они достигнуты.

Изменение сдвига и длины окна меняет состав признаков внутри формируемого объекта наблюдения, что влияет на работу алгоритма. В окна временных рядов сетевого трафика могут попадать разные аномальные значения (выбросы), которых не было при меньших размерах, моменты смены состояния системы, участки с разными шумовыми компонентами, паттерны, характерные для других состояний, неполные циклы событий, которые не укладываются целиком в окно.

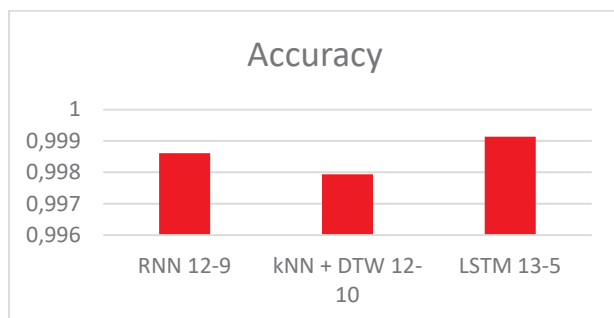


Рис. 5. Лучшие значения точности accuracy RNN, LSTM, kNN+DTW

Может проявляться проблема несовпадения границ окна и границ реальных событий, когда аномалии только частично попадают в окно, из-за чего их признаки искажаются и теряются часть важных характеристик. Изменяются характеристики последовательностей, искажаются корреляции между признаками, меняется соотношение «сигнал/шум», ухудшая видимость значимых паттернов временных рядов сетевого трафика.

В таблице 1 приведены лучшие значения показателей качества (3)-(6) на обработанном датасете для выбранных моделей.

Таблица 1

Лучшие значения показателей качества (3)-(6) на обработанном датасете

Модель	LSTM	RNN	kNN + DTW
Precision	0,857242	0,849506	0,858265
длина-сдвиг	14-5	12-9	12-2
Recall	0,811715	0,802622	0,814916
длина-сдвиг	14-5	12-9	12-3
F1-мера	0,833858	0,825399	0,83602895
длина-сдвиг	14-5	12-9	12-3
Accuracy	0,998607	0,997939	0,999135
длина-сдвиг	13-5	12-9	12-10

Различные значения показателей качества при изменении параметров длины и сдвига могут получаться ввиду чувствительности к локальному распределению данных, где небольшое смещение изменяет набор ближайших соседей и, соответственно, результат классификации. Нейросетевые модели способны по-разному интерпретировать частично перекрывающиеся паттерны и незначительный сдвиг способен изменить входные данные для слоев нейронов. Для модели kNN + DTW может происходить потеря информативных паттернов и включение шума.

В результате автоматического формирования объектов наблюдения временных рядов сетевого трафика изменением длины и сдвига образуются области классов, имеющих разные свойства. Компактность образуемых объектами разных классов областей их разделенность оказывает влияние на достигаемые показатели качества различными функциями. На рисунке 6 приведены средний коэффициент силуэта и индекс Дэвиса-Болдуина при изменении параметра «длина-сдвиг».

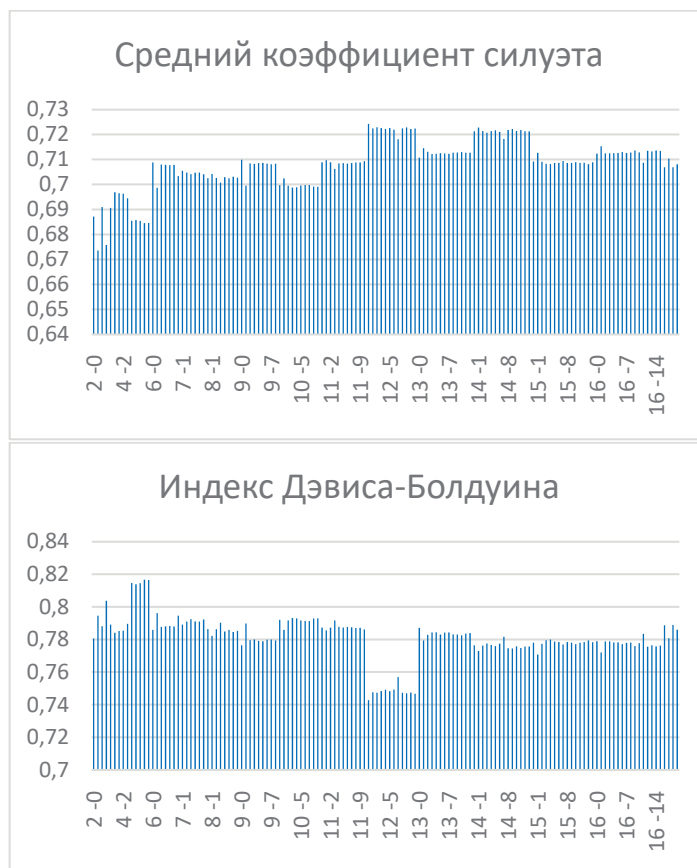


Рис. 6. Значения среднего коэффициента силуэта и индекс Дэвиса-Болдуина (ось ординат) по совмещенной оси «длина патча-сдвиг» (ось абсцисс)

Графики рисунка 6 позволяют оценить получаемые на различных длинах объектов наблюдения области классов. Лучшие значения разделения достигаются при длине объектов наблюдения 12 и 14 отчетов, где значения среднего коэффициента силуэта показывают хорошее разделение. Так же высокая компактность кластеров, когда объекты внутри кластера близки к его центру, и хорошая разделимость прослеживается на этих же длинах 12 и 14 в индексе Дэвиса-Болдуина.

Длина последовательности временного ряда сетевого трафика оказывает влияние на обобщающую способность моделей обработки данных. Длина патча может оказывать существенное влияние на достигаемые значения показателей качества обучения модели. Слишком короткие патчи не позволяют выявить информативные признаки и увеличивают количество трудноинтерпретируемых объектов наблюдения, находящихся на границе классов. Длинные патчи содержат большее количество слабо влияющих на разделение признаков, что увеличивает размерность пространства и вычислительные затраты.

Формирование объектов наблюдения сдвигом подпоследовательности можно рассматривать как метод аугментации данных. Он увеличивает число обучающих примеров, улучшает обобщающую способность модели и учит её распознавать признаки независимо от их позиции в последовательности. При перекрытии фрагментов, когда размер сдвига меньше длины патча, модель анализирует один и тот же признак в разных контекстах, что помогает улавливать локальные зависимости и игнорировать фоновый шум.

При формировании выборок из временных рядов сетевого трафика часть объектов может оказаться неинформативной или шумовой, что снижает качество классификации. Оптимальное определение длины патча и размера сдвига позволяет выделить значимые признаки. Однако изменение сдвига может привести к появлению схожих примеров, относящихся к разным классам, создавая дисбаланс в данных и затрудняя обучение модели. Значительное количество признаков может ухудшить результаты классификации из-за снижения качества обработки при наличии лишних, слабо влияющих на модель признаков.

Таким образом, в процессе подготовки обучающей выборки важно учитывать баланс между количеством и качеством признаков для успешной классификации.

4 Выводы

Формирование признакового пространства, выявление структур данных является важным этапом создания моделей машинного обучения.

Предлагаемое решение автоматической генерации объектов наблюдения временных рядов сетевого трафика позволяет создавать выборки и оценивать их эффективность используя анализ значений функционала качества. В отличие от классических подходов, в рассматриваемом методе происходит не настройка и оптимизация модели на выборке данных, а, наоборот, объекты наблюдения формируются из последовательности «под модель». Оценка достигаемого значения функционала качества модели дает возможность определить их свойства.

Достигаемое качество моделей машинного обучения определяется не только архитектурой используемой модели, но и характеристиками входных данных. Существенное влияние на итоговые результаты также оказывают параметры объектов наблюдения. Их оптимальная настройка повышает различимость классов, увеличивает долю эталонных данных и снижает уровень шума. Кроме того, предложенный подход может использоваться в качестве метода аугментации.

Однако успешное применение описанного в статье метода обусловлено соблюдением ряда условий. Свойства информационных последовательностей оказывают существенное влияние на качество их обработки моделями. В процессе формирования объектов наблюдения возможны ситуации, когда размер патча оказывается недостаточным для выделения паттерна, содержащего значимую информацию, либо, напротив, чрезмерно большим. В результате паттерн включает избыточное количество шумовых компонент, что негативно сказывается на качестве обработки.

Предложенный метод имеет ряд существенных ограничений. Для его эффективного применения анализируемые последовательности должны иметь паттерны или свойства, позволяющие их различать. Формируемые вектора объектов наблюдения должны содержать признаки, зависящие от целевой переменной, описывающей состояние. В противном случае может возникать эффект «случайности», не позволяющий создать адекватную модель, что потребует дополнительного анализа на поиск дополнительных влияющих факторов, формирования и вычисления новых признаков подпоследовательностей.

В случае соблюдения ограничений предложенное решение позволяет повысить качество обработки данных, и использовать менее ресурсоемкие модели при обработки сложных структур.

Литература

1. Wang C., Li X., Zhou T., Cai Z. Unsupervised Time Series Segmentation: A Survey on Recent // *Advances Computers, Materials & Continua*, 2024, vol. 80, no.2, pp. 2657-2673. doi:10.32604/cmc.2024.054061.
2. Golzari Oskouei A., Samadi N., Khezri S., Najafi Moghaddam A., Babaei H., Hamini K., Fath Nojavan S., Bouyer A., Arasteh B. Feature-weighted fuzzy clustering methods: An experimental review // *Neurocomputing*, 2025, vol. 619, art. 129176. doi:10.1016/j.neucom.2024.129176.
3. Schober P., Vetter T. R. Segmented Regression in an Interrupted Time Series Study Design // *Anesthesia and Analgesia*, 2021, vol.132, no. 3, pp. 696–697. doi:10.1213/ANE.0000000000000526
4. He Y., Zhang X., Kong X., Yao L., Song Z. Causality-driven sequence segmentation assisted soft sensing formultiphase industrial processes. // *Neurocomputing*, 2025, vol.631, art.129612. doi:10.1016/j.neucom.2025.129612.
5. Леохин Ю.Л., Дымкова С.С., Фатхуллин Т.Д. Методы машинного обучения в прикладных задачах прогнозирования динамично изменяющихся данных // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19, № 8. С. 49-63.
6. Sun C., Wu W., Zhang Z., Li Z., Ji B., Wang C. Time series clustering of dynamical systems via deterministic learning // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2024, vol. 15, pp. 2761-2779.
7. Naveed Anjum, Zohaib Latif, Hongsong Chen. Security and privacy of industrial big data: Motivation, opportunities and challenges // *Journal of Network and Computer Applications*, 2025, vol. 237, art. 04130, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104130>.
8. Лебедев И.С. Адаптивное применение моделей машинного обучения на отдельных сегментах выборки в задачах регрессии и классификации // *Информационно-управляющие системы*. 2022. № 3(118). С. 20-30.
9. Lebedev I. S., Sukhoparov M. E. Adaptive Learning and Integrated Use of Information Flow Forecasting Methods // *Emerging Science Journal*, 2023, vol. 7, no.3, pp. 704-723.
10. Pourafzal A., Fereidunian A., Safarihamid K. Chaotic Time Series Recognition: A Deep Learning Model Inspired by Complex Systems Characteristics // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* 2023, vol. 36, pp. 1-9.
11. Леохин Ю.Л., Дымкова С.С., Фатхуллин Т.Д., Мяличева А. А. Методы прогнозирования дефектов в программных продуктах на основе ретроспективной и текущей информации // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2026. Том 20. №1. С. 52-59.
12. Tallman E., West M. Bayesian predictive decision synthesis. // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B. Statistical Methodology*, 2024, vol.86, no. 2, pp. 340-363
13. Lebedev I., Sukhoparov M., Semenov V., Khasanov D. Adaptive Segmentation of Information Sequences for Machine Learning Modular Regression Models. // *Emerging Science Journal*. 2025. vol. 9. no. 5, pp. 2420–2438.
14. Salehi A., Balasubramanian M. Ddcnet: Deep dilated convolutional neural network for dense prediction // *Neurocomputing*, 2023, vol. 523, pp. 116-129.
15. Goswami M., Szafer K., Choudhry A. et al. Moment: A family of open time-series foundation models // *Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning*, vol. 235, 2024, pp. 16115-16152.
16. Woo G., Liu C., Kumar A., Xiong C., Savarese S., Sahoo D. Unified training of universal time series forecasting transformers //

International Conference on Machine Learning (ICML), 2024, pp. 1023-1035.

17. Zhiwu Huang, Xinlong Zhao. A novel multi-scale competitive network for fault diagnosis in rotating machinery // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 128, p. 107441.

18. Etemad A., Grover S., Jalali A. Segment, Shuffle, and Stitch: A Simple Layer for Improving Time-Series Representations. // *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2024, vol. 37, pp. 4878-4905. doi:10.52202/079017-0158.

19. Chen Y., Lu X., Xie Q. Collaborative networks of transformers and convolutional neural networks are powerful and versatile learners for accurate 3D medical image segmentation // *Computers in Biology and*

Medicine, 2023, vol. 164, p. 107228.

20. Ekambaram V., Ati A., Nguyen N., Sinthong P., Kalagnanam J. Tsmixer: Lightweight mlp-mixer model for multivariate time series forecasting // *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD '23*, 2023, pp. 459-469.

21. Vishwas B. V. K., Macharla S. R. MOIRAI: A Time Series LLM for Universal Forecasting // *Time Series Forecasting Using Generative AI*, 2025, pp. 183-194. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1276-7_7

22. Nanopoulos A., Alcock R., Manolopoulos Y. Feature-based classification of time-series data. // *International Journal of Computer Research*, 2001, vol. 10, pp. 49-61.

A METHOD FOR AUTOMATICALLY CONSTRUCTING A TRAINING DATASET OF NETWORK TRAFFIC TIME SERIES IN A SYSTEM STATE CLASSIFICATION PROBLEM

Ilya S. Lebedev, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, isl_box@mail.ru

Mikhail E. Sukhoparov, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia, mail@sukhoparovm.ru

This research is supported by RSF (grant № 25-21-00269, <https://rscf.ru/project/25-21-00269/>)

Abstract

This article presents a method for automatically generating network traffic time series observation objects for classifying the states of information and telecommunications systems. Growing network traffic data volumes, the ambiguity of various information system events, and the high complexity and labor intensity of labeling processes necessitate the development of adaptive data processing methods. Unlike classical approaches, the proposed method does not involve tuning and optimizing a model on a data sample; instead, observation objects are formed from a sequence "under the model." The proposed method automatically generates training samples by automatically splitting the original sequences into patches (subsequences) with variable length and shift. Data samples are formed from these patches. At each iteration, training, evaluation of achieved quality indicators, and selection of patch parameters and models that achieve the best results occur on the resulting samples. An experiment was conducted on a synthetic dataset for binary classification of the system state. It was shown that the use of a shift in the sequence improves generalization ability due to data augmentation, and the optimal patch size balances information content and noise level. The proposed method automates data preparation and enables the selection of optimal patch generation parameters, improves class distinguishability, can be used as a data augmentation method to improve model training, and enables the use of less resource-intensive models for processing complex data structures. The method improves classification quality by an average of 2-8%, reduces computational costs, enhances interpretability, and efficiently processes complex data structures.

Keywords: network traffic, time series, state classification, automatic object generation, machine learning

References

- [1] C. Wang, X. Li, T. Zhou, and Z. Cai, "Unsupervised Time Series Segmentation: A Survey on Recent Advances," *Computers, Materials & Continua*, vol. 80, no. 2, pp. 2657-2673, 2024. doi: 10.32604/cmc.2024.054061.
- [2] A. Golzari Oskouei, N. Samadi, S. Khezri, A. Najafi Moghaddam, H. Babaei, K. Hamini, S. Fath Nojavan, A. Bouyer, and B. Arasteh, "Feature-weighted fuzzy clustering methods: An experimental review," *Neurocomputing*, vol. 619, art. 129176, 2025. doi: 10.1016/j.neucom.2024.129176.
- [3] P. Schober and T. R. Vetter, "Segmented Regression in an Interrupted Time Series Study Design," *Anesthesia and Analgesia*, vol. 132, no. 3, pp. 696-697, 2021. doi: 10.1213/ANE.0000000000000526.
- [4] Y. He, X. Zhang, X. Kong, L. Yao, and Z. Song, "Causality-driven sequence segmentation assisted soft sensing for multiphase industrial processes," *Neurocomputing*, vol. 631, art. 129612, 2025. doi: 10.1016/j.neucom.2025.129612.
- [5] Yu. L. Lyokhin, S. S. Dymkova, and T. D. Fatkhulin, "Machine learning methods in applied forecasting tasks for dynamically changing data," *T-Comm*, vol. 19, no. 8, pp. 49-63, 2025.
- [6] C. Sun, W. Wu, Z. Zhang, Z. Li, B. Ji, and C. Wang, "Time series clustering of dynamical systems via deterministic learning," *International Journal of*

Machine Learning and Cybernetics, vol. 15, pp. 2761-2779, 2024.

- [7] N. Anjum, Z. Latif, and H. Chen, "Security and privacy of industrial big data: Motivation, opportunities and challenges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 237, art. 04130, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104130>.
- [8] I. S. Lebedev, "Adaptive application of machine learning models on individual sample segments in regression and classification tasks," *Information and Control Systems*, no. 3(118), pp. 20-30, 2022.
- [9] I. S. Lebedev and M. E. Sukhoparov, "Adaptive Learning and Integrated Use of Information Flow Forecasting Methods," *Emerging Science Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 704-723, 2023.
- [10] A. Pourafzal, A. Fereidunian, and K. Safarihamid, "Chaotic Time Series Recognition: A Deep Learning Model Inspired by Complex Systems Characteristics," *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 36, pp. 1-9, 2023.
- [11] Yu. L. Lyokhin, S. S. Dymkova, T. D. Fatkhulin, and A. A. Mialicheva, "Defect prediction methods in software products based on retrospective and current information," *T-Comm*, vol. 20, no. 1, pp. 52-59, 2026.
- [12] E. Tallman and M. West, "Bayesian predictive decision synthesis," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*, vol. 86, no. 2, pp. 340-363, 2024.
- [13] I. Lebedev, M. Sukhoparov, V. Semenov, and D. Khasanov, "Adaptive Segmentation of Information Sequences for Machine Learning Modular Regression Models," *Emerging Science Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 2420-2438, 2025.
- [14] A. Salehi and M. Balasubramanian, "DDCNet: Deep dilated convolutional neural network for dense prediction," *Neurocomputing*, vol. 523, pp. 116-129, 2023.
- [15] M. Goswami, K. Szafer, A. Choudhry et al., "MOMENT: A family of open time-series foundation models," in *Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning*, vol. 235, pp. 16115-16152, 2024.
- [16] G. Woo, C. Liu, A. Kumar, C. Xiong, S. Savarese, and D. Sahoo, "Unified training of universal time series forecasting transformers," in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, pp. 1023-1035, 2024.
- [17] Z. Huang and X. Zhao, "A novel multi-scale competitive network for fault diagnosis in rotating machinery," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 128, p. 107441, 2024.
- [18] A. Etemad, S. Grover, and A. Jalali, "Segment, Shuffle, and Stitch: A Simple Layer for Improving Time-Series Representations," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 37, pp. 4878-4905, 2024. doi: 10.52202/079017-0158.
- [19] Y. Chen, X. Lu, and Q. Xie, "Collaborative networks of transformers and convolutional neural networks are powerful and versatile learners for accurate 3D medical image segmentation," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 164, p. 107228, 2023.
- [20] V. Ekambaram, A. Ati, N. Nguyen, P. Sinthong, and J. Kalagnanam, "TSMixer: Lightweight MLP-Mixer model for multivariate time series forecasting," in *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '23)*, pp. 459-469, 2023.
- [21] B. V. K. Vishwas and S. R. Macharla, "MOIRAI: A Time Series LLM for Universal Forecasting," in *Time Series Forecasting Using Generative AI*, pp. 183-194, 2025. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1276-7_7.
- [22] Nanopoulos, A., R. Alcock, and Y. Manolopoulos, "Feature-based classification of time-series data," *International Journal of Computer Research*, vol. 10, pp.49-61, 2001.

Information about authors:

Ilya S. Lebedev, Ph.D., Dr. Sci., Professor, Chief Scientific Officer, Laboratory of Intelligent Systems, SPIIRAN, SPC RAS, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0001-6753-2181

Mikhail E. Sukhoparov, Ph.D., Dr. Sci., Assoc. Prof., Professor, Maritime Radio Communications Department, Admiral Makarov SU MIS, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0003-1798-8257

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОКОММУНИКАЦИЯМИ



Стремительность развития инфокоммуникаций и скорость появления новых поколений сетей связи уже не удивляет, в отличие от сервисов и услуг, которые начинают соперничать с научно-фантастическими фильмами. Постепенно сети пятого поколения и их возможности становятся нормой, а поколение B5G и 6G уже готовятся их сменить, предлагая сумасшедшие скорости, сверхнизкую задержку, распределенный искусственный интеллект. Умные города, иммерсивная дополненная реальность и кибербезопасность нового уровня – сети будущего создают основу для мира, в котором цифровая и физическая реальности сливаются в единую киберфизическую.

При этом эти новые сети связи, требуют новых подходов, систем и средств управления сетью, адекватных им и решаемых ими задачам. Новая книга "Управление инфокоммуникациями" охватывает основные технологии, научные достижения и практические применения управления современными телекоммуникациями.

Авторы анализируют практические вопросы управления сложнейшей современной телекоммуникационной инфраструктурой, показывая трансформацию систем

управления – от традиционных OSS/BSS к интеллектуальным, распределённым, облачно-ориентированным платформам, использующим искусственный интеллект, цифровые двойники, аналитику больших данных и автоматизацию полного жизненного цикла сервисов и ресурсов, показывают, как меняется сама философия эксплуатации: от реактивного реагирования на аварии к предиктивному управлению, автоматическому предотвращению инцидентов и оптимизации ресурсов в реальном времени.

Читатель сможет получить не только теоретическое представление о принципах построения современных систем управления, но и практические инструменты понимания процессов инвентаризации ресурсов, управления услугами, активами, качеством обслуживания, эксплуатацией и развитием сети.

На страницах книги рассматривается роль управления в условиях виртуализации сетевых функций, перехода к cloud-native архитектурам, сетевому slicing, edge-инфраструктурам и внедрению интеллектуальных механизмов самонастраивающихся сетей.

Книга будет полезна широкому кругу читателей – инженерам операторов связи, разработчикам OSS/BSS-платформ, архитекторам сетей, исследователям, преподавателям и студентам профильных вузов. Она может служить как современным учебным пособием, так и практическим руководством для специалистов, участвующих в создании и эксплуатации сетей нового поколения.



ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ФАЗОВЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-46-54

Тарасов Вениамин Николаевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,
veniamin_tarasov@mail.ru

Manuscript received 14 April 2026;
Accepted 17 June 2026

Бахарева Надежда Федоровна,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,
nadin1956_04@inbox.ru

Ключевые слова: фазовые распределения Кокса,
системы массового обслуживания, спектральный метод
решения уравнения Линдли, коэффициент вариации,
телетрафик

В работе демонстрируются полученные результаты анализа систем массового обслуживания (СМО) общего вида, которые описываются фазовыми распределениями Кокса второго порядка $C2/C2/1$. О применении фазовых распределений в теории массового обслуживания известно давно. Этот класс распределений подходит в качестве математического аппарата для анализа телетрафика сетей будущего поколения, характеризующегося высокой вариативностью и обладающего эффектом самоподобия. Для нахождения среднего времени ожидания требований в очереди использован спектральный метод для решения интегрального уравнения Линдли с нахождением нулей и полюсов спектрального разложения в виде отношения рациональных функций, которые в данном случае сводятся к полиномам четвертой степени. Данный метод менее трудоемкий, чем классический матрично-геометрический метод, в котором используются операции Кронекера и итерации. В работе представлена численно-аналитическая модель для среднего времени ожидания требований в очереди для системы с распределениями Кокса второго порядка. Для оценки точности полученного решения проведены вычислительные эксперименты для малых, средних и высоких значений коэффициентов вариаций временных интервалов и загрузки системы. Полученные данные позволяют определить оценки производительности узлов коммутации при росте стохастической неопределенности телетрафика. Следовательно, пренебрежение фазовой структурой законов распределений СМО при проектировании высоко нагруженных систем различного назначения ведет к недооценке задержек пакетов в узлах коммутации во много раз. Сравнение с близкими системами демонстрирует полную адекватность полученных результатов.

Информация об авторах:

Тарасов Вениамин Николаевич, Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и робототехнических систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. ORCID: 0000-0002-9318-0797

Бахарева Надежда Федоровна, Доктор технических наук, профессор кафедры информатики и робототехнических систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. ORCID: 0000-0002-9850-7752

Для цитирования:

Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф. Исследование систем массового обслуживания с фазовыми распределениями // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 46-54.

For citation:

V. N. Tarasov, N. F. Bakhareva. "Study of Queueing Systems with phase Distributions," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no.7, pp. 46-54. (in Russian)

Введение

Усложнение структуры телетрафика характерная черта современных сетей телекоммуникаций и эмпирические исследования однозначно демонстрируют, что коэффициент вариации интервалом между поступлениями пакетов значительно может превышать единицу ($cv > 1$), что свидетельствует о наличии тяжелых хвостов в распределениях. Для математического описания таких процессов и ранее и в настоящее время используют фазовые распределения РН (phase-type distributions) с их матрично-аналитическими методами [1-4, 9, 11-15]. Среди них особое место занимают распределения Кокса порядка k (C_k) и как его частные случаи – гиперэрланговское (HEr) и гиперэкспоненциальное (Hr) распределения (рис. 1).

Плотность распределения вероятностей Кокса в общем случае записывается в виде матричной экспоненты

$$f(t) = \mathbf{a} e^{\mathbf{A}t} \mathbf{s}^0,$$

где

$\mathbf{a} = (1, 0, \dots, 0)$ – вектор начальных состояний системы (вероятностей фаз), причем действие всегда начинается с первой фазы;

$\mathbf{A}$ – квадратная матрица интенсивностей переходов размерности $k \times k$;

$\mathbf{s}^0$ – вектор скоростей выхода в поглощающее состояние (завершение процесса).

$e^{\mathbf{A}t}$ – матричная экспонента, описывающая вероятность нахождения системы в каждой из фаз в момент t , определяемая через ряд Тейлора $e^{\mathbf{A}t} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\mathbf{A}t)^k}{k!}$.

Функция распределения вероятностей имеет вид

$$F(t) = 1 - \mathbf{a} e^{\mathbf{A}t} \mathbf{I},$$

где $\mathbf{I}$ – единичный вектор столбец.

Для анализа СМО типа РН/РН/1 обычно используют матрично-геометрический метод (МГМ) с формированием базовых матриц через тензорное (Кронекеровское) произведение векторов и матриц параметров поступлений требований и их обслуживания. Например, в случае двухфазной системы это будут базовые матрицы $\mathbf{A}_0$ (матрица поступлений), $\mathbf{A}_1$ (матрица внутренних переходов), $\mathbf{A}_2$ (матрица уходов требований после обслуживания). Тогда задача сводится к решению матричного уравнения $\mathbf{A}_0 + \mathbf{R}\mathbf{A}_1 + \mathbf{R}^2\mathbf{A}_2 = 0$ относительно матрицы $\mathbf{R}$ четвертого порядка методом итераций. После этого через матрицу $\mathbf{R}$ определяют векторы вероятностей того, что система свободна от требований $\boldsymbol{\pi}_0$ и того, что система находится на уровне 1 $\boldsymbol{\pi}_1$.

В этой работе мы остановимся на распределении Кокса второго порядка C_2 , которое в терминах фазовых распределений описывается вектором начальных состояний $\mathbf{a} = (1, 0)$, вектором скоростей выхода в поглощающее состояние $\mathbf{s}^0 = \begin{pmatrix} p_1 \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix}$ и матрицей интенсивностей переходов

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\lambda_1 & p_1 \lambda_1 \\ 0 & -\lambda_2 \end{pmatrix}.$$

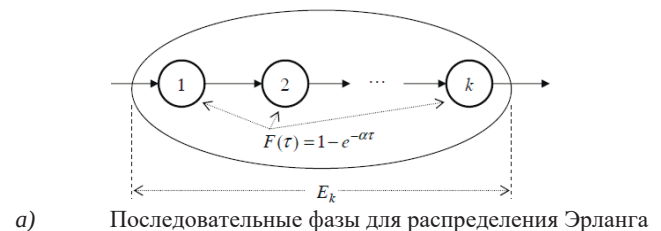
Аналогично будут выглядеть эти векторы и матрица для процесса обслуживания путем замены символа λ на μ и вероятности p_1 на r_1 .

Особое свойство фазовых распределений, это возможность универсальной аппроксимации произвольных законов распределений с использованием их начальных моментов. Например, распределение Кокса второго порядка позволяет аппроксимировать произвольные законы распределений с использованием двух моментов – средних значений интервалов поступлений и времени обслуживания и их коэффициентов вариаций. Распределение Кокса третьего порядка кроме средних значений интервалов поступлений и времени обслуживания и их коэффициентов вариаций еще может учитывать коэффициент асимметрии распределения.

Для схемы на рис. 1а) функция плотности принимает вид $f_k(t) = \alpha(\alpha t)^{k-1} e^{-\alpha t} / (k-1)!$, а для рис. 1б) –

$$f(t) = \sum_{i=1}^r q_i \alpha_i e^{-\alpha_i t} \quad [5-8].$$

Комбинация последовательных и параллельных экспоненциальных фаз с соответствующими параметрами и дает распределение Кокса [1] (рис. 2).



Если добавить параллельные фазы, тогда будет гиперэрланговское распределение HE_k

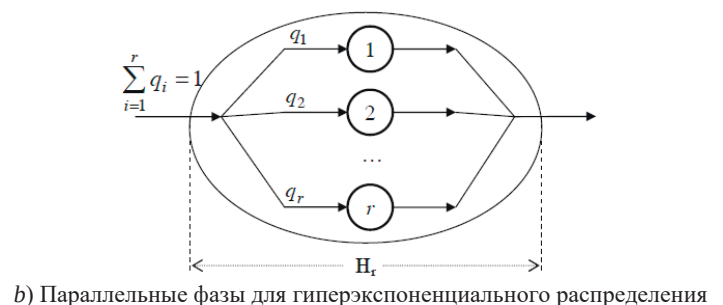


Рис. 1. Представление фазовых распределений

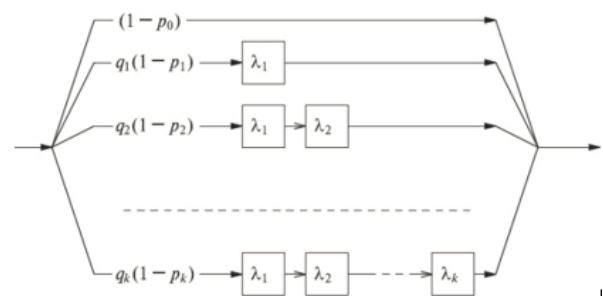


Рис. 2. Параллельно-последовательные фазы распределения Кокса C_k

Таким образом, это распределение представляет наиболее универсальную структуру: требование проходит представленные фазы последовательно, но после каждой фазы k оно может либо перейти с вероятностью p_1 на следующую фазу, либо покинуть систему с вероятностью $1-p_1$. Поэтому структура распределения Кокса разнится от гиперэкспоненциального распределения (рис.1b), где моделируется ситуация «или-или», а Кокс – «последовательность фаз, с возможностью досрочного прерывания».

Для распределения Кокса второго порядка с учетом рис.2, схема упрощается до двух последовательных фаз. При этом процессы поступления и обслуживания состоят из максимум двух этапов с интенсивностями λ_1 и λ_2 , где первая фаза выполняется всегда первой с интенсивностью λ_1 . Затем происходит разветвление после завершения первой фазы и процесс может: 1) завершиться с вероятностью p_1 , в терминах рис.2 это соответствует ветке $(1-p_0)$ или $q_1(1-p_1)$ в простейших случаях; 2) перейти ко второй фазе с вероятностью $(1-p_1)$, что соответствует ветке с $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$.

Вторая фаза имеет интенсивность λ_2 и всегда ведет к завершению процесса.

Настоящая статья является продолжением исследований авторов моделей массового обслуживания с фазовыми распределениями [5-8], в которых доказательно подтверждена существенная зависимость времени ожидания требований в очереди от величин коэффициентов вариаций временных интервалов, а также от моментов более высокого порядка.

1. Постановка и решение задачи

В работе ставится задача построения практически значимой аналитической модели для системы $C_2/C_2/1$ с независимыми распределениями Кокса второго порядка и доведения ее до численного решения относительно среднего времени ожидания требований в очереди. Данное распределение обеспечивает коэффициент вариации $c_v \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$. Это минимальное значение обеспечивает распределение Эрланга второго порядка. Например, значение коэффициента вариации $c_v=0,5$ уже не укладывается в структуру распределения Кокса второго порядка, т.к. для этого нужно взять уже распределение Эрланга четвертого порядка.

Таким образом, мы имеем здесь диапазон коэффициента вариации меньше и больше единицы. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью расширения математического аппарата для исследования высоко вариативного телетрафика с целью более точной оценки времени ожидания в очереди, и, следовательно, более точного расчета объемов буферных устройств. Для вывода решения использован метод спектрального разложения уравнения Линдли [5-12].

Таким образом, мы имеем здесь диапазон коэффициента вариации меньше и больше единицы. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью расширения математического аппарата для исследования высоко вариативного телетрафика с целью более точной оценки времени ожидания в очереди, и, следовательно, более точного расчета объемов буферных устройств. Для вывода решения использован метод спектрального разложения уравнения Линдли [5-12].

Применение спектрального метода на основе факторизации Винера-Хопфа в этом случае обеспечивает получение точного решения, учитывающего не только первые два момента распределения Кокса, но и его структурных параметров в виде вероятностей переходов между фазами, что и определяет научную новизну данной работы. Кроме этого, как будет установлено ниже, этот метод приводит к исследованию полинома четвертой степени и в итоге к нахождению нулей и

поллюсов спектрального разложения. Причем сам метод априори предполагает существование и единственность такого спектрального разложения, и этот факт подтверждается практическими вычислениями.

Исходя из структуры общего распределения Кокса C_k (рис. 2), в случае двухфазного распределения для $k=2$ запишем функцию плотности распределения интервалов поступлений для наиболее распространенного случая $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Вначале приведем некоторые пояснения, а для этого рассмотрим систему с двумя состояниями S_1 и S_2 , причем процесс всегда начинается с состояния S_1 . В этом состоянии время распределено по экспоненциальному закону с параметром λ_1 . По завершении фазы 1 процесс переходит в фазу 2 с вероятностью p_1 или завершается с вероятностью $q_1=1-p_1$ (рис. 2). В состоянии S_2 время опять распределено по экспоненциальному закону, но с параметром λ_2 , после чего процесс всегда завершается.

Из пояснений следует, что для распределения C_2 с двумя фазами, функция плотности распределения представляет собой взвешенную сумму экспоненциальной плотности и свертки двух экспоненциальных плотностей. В этом заключается главное отличие распределения Кокса второго порядка от гиперэкспоненциального распределения того же порядка. Таким образом, имеем функцию плотности вида

$$f_{\lambda}(t) = (1-p_1)\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + p_1 \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 y} \lambda_2 e^{-\lambda_2(t-y)} dy.$$

После интегрирования свертки и несложных преобразований получим

$$f_{\lambda}(t) = (1-p_1)\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + p_1 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (1)$$

Функцию плотности (1) также можно представить в виде линейной комбинации двух экспонент по аналогии с гиперэкспоненциальным распределением (см. рис.1b):

$$f_{\lambda}(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (2)$$

где коэффициенты $c_1 = 1 - p_1 \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)$, $c_2 = p_1 \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)$, $c_1 + c_2 = 1$ для нормировки. В отличие от гиперэкспоненциального и гиперэрланговского распределений, здесь коэффициенты c_1 и c_2 не являются вероятностными весами, а один из них вовсе может быть отрицательным или даже больше единицы.

Это связано с тем, что распределение Кокса описывает последовательно-параллельные фазы, а не просто случайный выбор между двумя независимыми приборами обслуживания. Не смотря на особенности коэффициентов линейной комбинации, функция плотности (2) всегда будет неотрицательной и корректной функцией плотности распределения вероятностей.

Заменой символа λ на μ в выражении (1) запишем функцию плотности распределения времени обслуживания

$$f_{\mu}(t) = (1-r_1)\mu_1 e^{-\mu_1 t} + r_1 \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t}) \quad (3)$$

или

$$f_{\mu}(t) = d_1 \mu_1 e^{-\mu_1 t} + d_2 \mu_2 e^{-\mu_2 t}, \quad (4)$$

где коэффициенты линейной комбинации $d_1 = 1 - r_1\mu_1 / (\mu_1 - \mu_2)$, $d_2 = r_1\mu_1 / (\mu_1 - \mu_2)$, $d_1 + d_2 = 1$.

Представление функций плотности распределения Кокса в виде линейной комбинации экспоненциальных распределений удобно прежде всего для нахождения их изображений Лапласа. Общая формула для изображения Лапласа для функции плотности с параметрами γ_1 , γ_2 и с коэффициентами линейной комбинации l_1 , l_2 имеет вид $F^*(s) = l_1 \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + s} + l_2 \frac{\gamma_2}{\gamma_2 + s}$.

Заметим, что распределение Кокса, как и упомянутые выше гиперэкспоненциальное и гиперэрланговское распределения при определенных значениях коэффициента вариации, может описывать распределения с тяжелым хвостом. Такие случаи рассмотрены в [9-11, 16].

2. Спектральное решение уравнения Линдли для системы C2/C2/1

Известны всего три формы записи интегрального уравнения Линдли [2]. В зависимости от постановки задачи, используются разные формы этого уравнения [5-12]. Мы для решения поставленной задачи используем форму уравнения Линдли относительно функции распределения вероятностей времени ожидания требования в очереди $W(y)$ вида:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0, \\ 0, & y < 0. \end{cases}$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(u)$ - функция распределения вероятностей случайной величины $u = \tau_\mu - \tau_\lambda$ в виде разности двух важных случайных величин – времени обслуживания требования и интервала времени между поступлениями требований.

Далее нам понадобятся изображения Лапласа для функций плотности (2) и (4):

$$F_\lambda^*(s) = c_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + s} + c_2 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + s}, \quad F_\mu^*(s) = d_1 \frac{\mu_1}{\mu_1 + s} + d_2 \frac{\mu_2}{\mu_2 + s}. \quad (5)$$

Нам требуется получить спектральное представление выражения $F_\lambda^*(-s)F_\mu^*(s) - 1 = \alpha(s)/\beta(s)$ в виде отношения двух рациональных функций с учетом изображений Лапласа (5).

При этом компоненты спектрального разложения $\alpha(s)$ и $\beta(s)$ должны удовлетворять специальным условиям в комплексной плоскости s . В полуплоскости $\text{Re}(s) > 0$ компонента $\alpha(s)$ должна быть аналитической без нулей. В полуплоскости $\text{Re}(s) < D$, где постоянная величина D определяется условием $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f_\lambda(t)}{e^{-Dt}} < \infty$, компонента $\beta(s)$ должна быть аналитической без нулей.

Развернем последнее выражение в виде

$$\left(\frac{c_1\lambda_1}{\lambda_1 - s} + \frac{c_2\lambda_2}{\lambda_2 - s} \right) \left(\frac{d_1\mu_1}{\mu_1 + s} + \frac{d_2\mu_2}{\mu_2 + s} \right) = 1, \quad (6)$$

и перепишем его в виде

$$\frac{\lambda_1\lambda_2 - (c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2)s}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)} \cdot \frac{\mu_1\mu_2 + (d_1\mu_1 + d_2\mu_2)s}{(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)} = 1. \quad (7)$$

Для получения разложения для выражения (7) в виде отношения двух рациональных функций и упрощения последующих выражений вводим промежуточные параметры в виде средних интенсивностей поступлений $\bar{\lambda} = c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2$, обслуживания $\bar{\mu} = d_1\mu_1 + d_2\mu_2$ с учетом условий $c_1 + c_2 = 1$ и $d_1 + d_2 = 1$. Тогда выражение (7) примет вид:

$$(\lambda_1\lambda_2 - \bar{\lambda}s)(\mu_1\mu_2 + \bar{\mu}s) = (\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\mu_1 + s)(\mu_2 + s).$$

Раскрывая скобки и приводя подобные члены с помощью символьных операций Mathcad для их группировки, получим полином четвертой степени вида $-s(s^3 + as^2 + bs + c)$, в котором степень можно понизить до трех из-за равного нулю свободного члена, т.к. произведение параметров распределений (2) и (4) $\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2$ присутствует и в левой и в правой частях равенства. Таким образом, в числителе спектрального разложения $\alpha(s)/\beta(s)$ получили кубическое уравнение вида

$$s^3 + as^2 + bs + c = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты $a = \mu_1 + \mu_2 - \lambda_1 - \lambda_2$, $b = \lambda_1\lambda_2 + \mu_1\mu_2 - (\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2) + \bar{\lambda}\bar{\mu}$, $c = \lambda_1\lambda_2(\mu_1 + \mu_2 - \bar{\mu}) - \mu_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2 - \bar{\lambda})$ являются функциями параметров распределений (2) и (4).

Исследование кубического уравнения с помощью теоремы Виета, показывает, что оно имеет два вещественных корня в левой полуплоскости комплексной плоскости s , либо два комплексных корня с отрицательной вещественной частью и один положительный в случае стационарного режима работы системы, т.е. когда коэффициент загрузки $\rho = \bar{\rho} = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda < 1$. Обозначим эти корни $-s_1, -s_2, s_3$. Это важный момент спектрального метода, сводящегося к нахождению и исследованию нулей и полюсов полученного разложения в комплексной плоскости s . С учетом одного нулевого корня $s=0$ в нашем случае спектральное разложение в виде отношения двух рациональных функций принимает вид

$$\frac{\alpha(s)}{\beta(s)} = \frac{-s(s + s_1)(s + s_2)(s - s_3)}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)}. \quad (9)$$

Согласно методу спектрального решения, функция $\alpha(s)$ будет включать корни и полюса (9) на левой полуоси комплексной плоскости s , а функция $\beta(s)$ – на правой полуоси:

$$\alpha(s) = \frac{s(s + s_1)(s + s_2)}{(s + \mu_1)(s + \mu_2)}, \quad \beta(s) = \frac{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)}{(s_3 - s)}.$$

Здесь компонента спектрального разложения $\alpha(s)$ в дальнейшем будет отвечать за среднее время ожидания требований в очереди, а компонента $\beta(s)$ – за средний период простоя

системы. Корректность конструирования компонент спектрального разложения проверяется выполнением специальных условий спектрального метода

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \operatorname{Re}(s) > 0} \frac{\alpha(s)}{s} = 1, \quad \lim_{|s| \rightarrow \infty, \operatorname{Re}(s) < D} \frac{\beta(s)}{s} = -1.$$

Выполнение этих условий в нашем случае очевидно.

Теперь находим промежуточный параметр C_0 , связанный с рациональной функцией $\alpha(s)$. Параметр C_0 физически определяет вероятность того, что поступающее в систему требование, заставит ее свободной от требований:

$$C_0 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\alpha(s)}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(s + s_1)(s + s_2)}{(s + \mu_1)(s + \mu_2)} = \frac{s_1 s_2}{\mu_1 \mu_2}.$$

Тогда функция $\frac{C_0 s}{\alpha(s)} = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 (s + s_1)(s + s_2)}$ будет изображением Лапласа для функции плотности времени ожидания, т.е.

$$W^*(s) = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 (s + s_1)(s + s_2)} \quad (10)$$

Среднее время ожидания требований в очереди $\bar{W}$ определяем как первый начальный момент, используя изображение Лапласа (10) функции плотности

$$-\frac{dW^*(s)}{ds} \Big|_{s=0} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2},$$

т.е.

$$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \quad (11)$$

В численно-аналитической модели (11) s_1 и s_2 являются абсолютными значениями отрицательных корней $-s_1, -s_2$ кубического полинома (8) с вышеприведенными коэффициентами a, b, c , а μ_1 и μ_2 – параметры распределения (4).

3. Практическая реализация численно-аналитической модели

Алгоритм реализации модели (11) схож с подобными алгоритмами авторов для СМО с распределениями в виде вероятностных смесей [5-8], но со своими особенностями. Определим параметры модели (11) s_1, s_2, μ_1, μ_2 в два этапа. На первом этапе определим начальные моменты распределений (2) и (4) через найденные выше изображения Лапласа (5).

Для распределения (2) средний интервал между поступлениями требований

$$\bar{\tau}_\lambda = -\frac{dF_\lambda^*(s)}{ds} \Big|_{s=0} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{p_1}{\lambda_2}, \quad (12)$$

второй начальный момент $\frac{\bar{\tau}_\lambda^2}{2} = \frac{d^2 F_\lambda^*(s)}{ds^2} \Big|_{s=0} = 2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{p_1}{\lambda_1 \lambda_2} + \frac{p_1}{\lambda_2^2}\right)$. Тогда дисперсия интервалов поступлений

$$D_{\tau_\lambda} = 2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{p_1}{\lambda_1 \lambda_2} + \frac{p_1}{\lambda_2^2}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{p_1}{\lambda_2}\right)^2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{p_1(2-p_1)}{\lambda_2^2}.$$

Квадрат коэффициента вариации

$$c_\lambda^2 = \frac{D_{\tau_\lambda}}{\bar{\tau}_\lambda^2} = \frac{\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{p_1(2-p_1)}{\lambda_2^2}}{\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{p_1}{\lambda_2}\right)^2}.$$

Окончательно после упрощения, квадрат коэффициента вариации будет иметь вид

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_2^2 + p_1 \lambda_1^2 (2-p_1)}{(\lambda_2 + p_1 \lambda_1)^2}. \quad (13)$$

Таким образом, для определения трех параметров распределения (2) $\lambda_1, \lambda_2, p_1$ мы получили два уравнения моментов (12) и (13). На втором этапе полученную систему двух уравнений (12) и (13) относительно трех неизвестных $\lambda_1, \lambda_2, p_1$ решим методом подстановки. Выберем значения λ_1, λ_2 так, чтобы они удовлетворяли уравнению (12): $\lambda_1 = 2 / \bar{\tau}_\lambda$, $\lambda_2 = 2p_1 / \bar{\tau}_\lambda$. Потребуем, чтобы они удовлетворяли также уравнению (13). Тогда подставив эти значения λ_1, λ_2 в равенство (13), получим неполное квадратное уравнение относительно вероятности p_1 в зависимости от входных параметров $\bar{\tau}_\lambda$ и c_λ : $8p_1(1-2p_1c_\lambda^2) / \bar{\tau}_\lambda^2 = 0$.

Отбросив здесь тривиальный нулевой корень, получим нужное значение $p_1 = \frac{1}{2c_\lambda^2}$, которое в свою очередь приводит

к ограничению модели (11) для системы $C_2/C_2/1$ в виде

$c_\lambda \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$. Таким образом, параметры распределения

(2) $\lambda_1 = 2 / \bar{\tau}_\lambda$, $\lambda_2 = 2p_1 / \bar{\tau}_\lambda$, $p_1 = \frac{1}{2c_\lambda^2}$ определены однозначно.

значно.

Повторив эти действия для параметров распределения (4) μ_1, μ_2, r_1 , мы можем записать их выражения в виде $\mu_1 = 2 / \bar{\tau}_\mu$,

$$\mu_2 = 2r_1 / \bar{\tau}_\mu, \quad r_1 = \frac{1}{2c_\mu^2}.$$

Таким образом, мы здесь установили область применимости системы $C_2/C_2/1$ по коэффициентам вариаций $c_\lambda \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ и

$c_\mu \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$, а также по загрузке системы $0 < \rho = \frac{\bar{\tau}_\mu}{\bar{\tau}_\lambda} < 1$.

После определения неизвестных параметров распределений (2) и (4) через заданные входные параметры $\bar{\tau}_\lambda, \bar{\tau}_\mu, c_\lambda, c_\mu$ – средние значения интервалов поступлений и времени

обслуживания и их коэффициентов вариаций, формируем кубическое уравнение (8) с вышеприведенными коэффициентами. Решая его, находим абсолютные значения отрицательных корней $-s_1$ и $-s_2$.

Для подтверждения адекватности приведенных выше теоретических выводов ниже приведены результаты вычислительных экспериментов на Mathcad.

4. Результаты вычислительных экспериментов

В таблице 1 приведены результаты расчетов среднего времени ожидания требований в очереди для СМО $C_2/C_2/1$ для широкого диапазона изменчивости коэффициентов вариаций и коэффициента загрузки системы. Расчеты проведены для единичного времени обслуживания. Эти данные сравниваются с результатами близких СМО $HE_2/HE_2/1$ и $H_2/H_2/1$, полученными авторами в [5] и [6]. Прочерки в таблице 1 указывают на тот факт, что система $H_2/H_2/1$ не применима в случае, когда коэффициенты вариации меньше единицы.

Таблица 1

Результаты расчетов для близких СМО $C_2/C_2/1$, $HE_2/HE_2/1$, $H_2/H_2/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания		
ρ	(c_λ, c_μ)	СМО $C_2/C_2/1$	СМО $HE_2/HE_2/1$ [5]	СМО $H_2/H_2/1$ [6]
0,1	(0,71, 0,71)	0,02	0,02	—
	(1, 1)	0,11	0,05	0,11
	(2, 2)	0,48	0,34	0,45
	(4, 4)	1,83	1,68	1,78
	(8, 8)	7,17	7,16	7,11
0,5	(0,71, 0,71)	0,40	0,40	—
	(1, 1)	1,0	0,87	1,0
	(2, 2)	4,23	3,98	4,04
	(4, 4)	16,40	16,53	16,13
	(8, 8)	64,47	66,73	64,18
0,9	(0,71, 0,71)	4,40	4,40	—
	(1, 1)	9,0	8,94	9,0
	(2, 2)	36,45	36,21	36,20
	(4, 4)	145,21	145,31	144,83
	(8, 8)	578,30	580,56	577,86

Результаты таблицы 1 полностью подтверждают выводы общей теории систем $G/G/1$ о нелинейной зависимости среднего времени ожидания требований в очереди от коэффициентов вариаций интервалов между поступлениями и времени обслуживания. Эта нелинейная связь на самом деле квадратическая (рис. 3).

В связи с большим разбросом данных по среднему времени ожидания $\bar{W}$ от 0,02 до 578 в таблице 1, его зависимость от коэффициентов вариаций на рис.3 показана в логарифмической шкале.

Из расчетов следует, что при высокой загрузке $\rho=0,9$ система $C_2/C_2/1$ крайне чувствительна к любым флуктуациям, т.к. даже при умеренных значениях коэффициентов вариаций $(c_\lambda, c_\mu)=2,0$, среднее время ожидания в девять раз больше, чем при средней загрузке $\rho=0,5$ (рис. 3, 4).

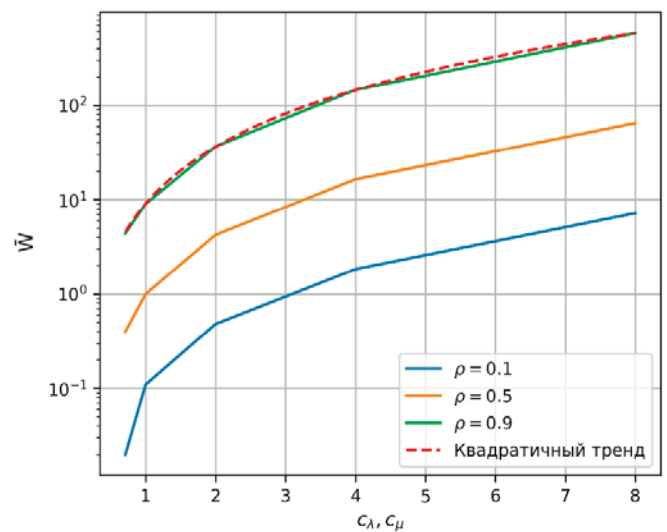


Рис. 3. Характер зависимости среднего времени ожидания от коэффициентов вариаций в логарифмической шкале

На рис. 4 показан характер зависимости среднего времени ожидания требований в очереди от коэффициента загрузки системы при фиксированных значениях коэффициентов вариаций. При минимальных коэффициентах вариации, равных $(c_\lambda, c_\mu)=0,71$, когда трафик моделируется распределением Эрланга второго порядка, даже при загрузке системы $\rho=0,9$ задержка $\bar{W}=4,4$ остается в разумных пределах, что в 131 раз меньше, чем при $(c_\lambda, c_\mu)=8$.

При критической загрузке $\rho=0,9$ и высокой вариативности трафика $(c_\lambda, c_\mu)=8$, когда трафик моделируется гиперэкспоненциальным распределением второго порядка, среднее время ожидания в 578 раз превышает среднее время обслуживания. Таким образом, убеждаемся в том, что спектральный метод сохраняет вычислительную устойчивость для широкого диапазона изменения как загрузки системы, так и коэффициентов вариации временных интервалов.

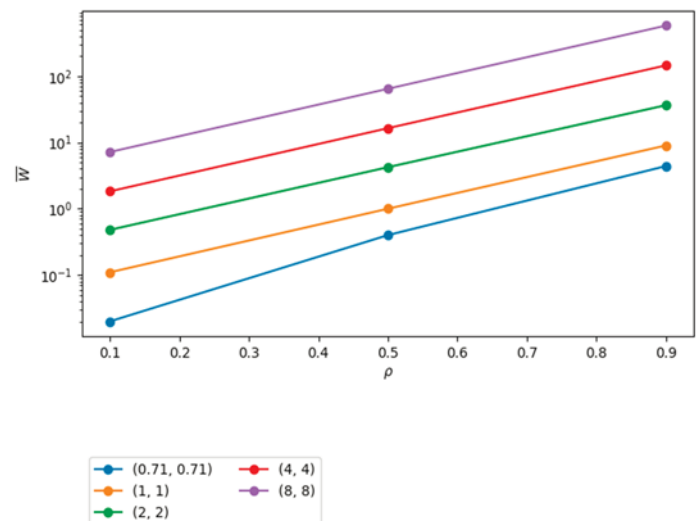


Рис. 4. Зависимость среднего времени ожидания от загрузки системы при фиксированных коэффициентах вариации

Более полную картину зависимости среднего времени ожидания $\bar{W}$ от всех входных параметров системы демонстрирует 3D рисунок 5, фактически совмещающий рисунки 3 и 4. Если здесь рассматривать зависимость раздельно от каждого из коэффициентов вариаций c_λ и c_μ , то можно было бы увидеть, что рост коэффициента вариации времени обслуживания $c_\mu > 1$ оказывает более деструктивное влияние на длину очереди через среднее время обслуживания, чем коэффициент вариации интервалов между поступлениями требований c_λ . Для специалистов сетей связи последний факт означает, что стабилизация времени обработки пакетов в узлах коммутации возможна, например через приоритезацию обслуживания.

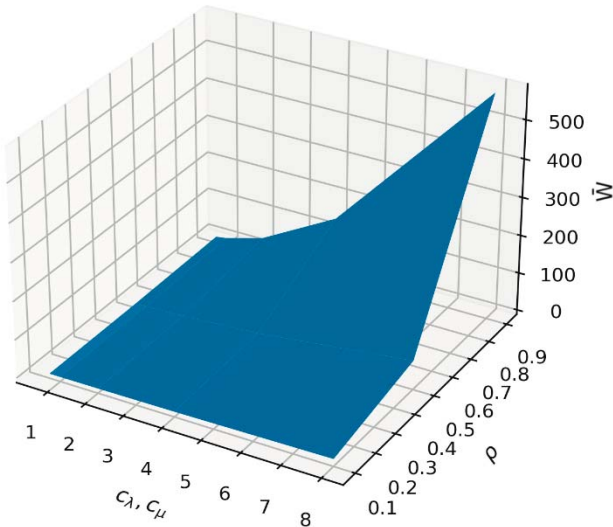


Рис. 5. Зависимость среднего времени ожидания $\bar{W}$ от входных параметров системы

Из того факта, что система $C_2/C_2/1$ является крайне чувствительной к величинам коэффициентов вариаций, о чем однозначно свидетельствуют рисунки 3–5, следует, что среднее время ожидания требований в очереди также крайне чувствительно к параметрам распределений (2), (4) $p_1, \lambda_1, \lambda_2$ и r_1, μ_1, μ_2 , т.к. все они однозначно зависят от используемых коэффициентов вариаций.

5. Верификация модели и ее результатов

Результаты расчетов таблицы 1 по представленной численно-аналитической модели системы $C_2/C_2/1$ в сравнении с близкими СМО $HE_2/HE_2/1$ и $H_2/H_2/1$ демонстрируют поразительную идентичность рассматриваемых систем несмотря на различие структуры СМО $C_2/C_2/1$ с остальными рассматриваемыми системами. Небольшие отклонения между значениями в таблице 1 однозначно объясняются тем, что у всех трех распределений различны моменты третьего порядка и выше, хотя в расчетах взяты одинаковые средние значения и коэффициенты вариации. Сходство рассматриваемых систем заключается еще в том, что они однозначно подтверждают теорию систем общего вида $G/G/1$ о прямой зависимости среднего времени ожидания от дисперсий интервалов поступлений и времени обслуживания, т.е. от квадратов коэффициентов вариации.

Теперь верифицируем полученные результаты с данными аппроксимации Маршала среднего времени ожидания требований в очереди, которая является модификацией предельной формулы Кингмана $\bar{W} \approx \frac{\sigma_\lambda^2 + \sigma_\mu^2}{2\bar{c}_\lambda(1-\rho)}$, выведенной для случая

большой загрузки системы ($\rho \rightarrow 1$). Аппроксимация Маршала в наших обозначениях принимает вид $\bar{W} \approx \frac{\rho^2 \bar{c}_\lambda (c_\lambda^2 + c_\mu^2)}{2(1-\rho)}$. Ниже в таблице 2 приведены результаты

аппроксимации Маршала в сравнении с нашими данными для системы $C_2/C_2/1$. В таблице 2 аппроксимация Маршала обозначено АМ.

Таблица 2

Сравнительные результаты для системы $C_2/C_2/1$ с АМ

Входные параметры		Среднее время ожидания		δ%
ρ	(c_λ, c_μ)	СМО $C_2/C_2/1$	АМ	
0,1	(0,71,0,71)	0,02	0,05	150
	(1,1)	0,11	0,11	0,0
	(2,2)	0,48	0,44	8,0
	(4,4)	1,83	1,78	2,7
	(8,8)	7,17	7,11	0,8
0,5	(0,71,0,71)	0,40	0,50	25
	(1,1)	1,0	1,0	0,0
	(2,2)	4,23	4,0	5,4
	(4,4)	16,40	16,0	2,4
	(8,8)	64,47	64,0	0,7
0,9	(0,71,0,71)	4,40	4,54	3,2
	(1,1)	9,0	9,0	0,0
	(2,2)	36,45	36,0	1,2
	(4,4)	145,21	144,0	0,8
	(8,8)	578,30	576	0,4

Заметная разница между результатами системы $C_2/C_2/1$ и АМ как и ожидалось, наблюдается в случаях малой загрузки систем ρ и малых коэффициентов вариации, меньших единицы. В остальных случаях наблюдается достаточно умеренная относительная погрешность. Тем самым, верификация модели и ее результатов путем сравнения с близкими системами и аппроксимацией Маршала полностью подтверждена.

6. Перспективы дальнейших исследований

Несмотря на достаточно высокую точность построенной численно-аналитической модели массового обслуживания для системы $C_2/C_2/1$, распределение C_2 ограничено возможностью описания лишь двух фаз процессов поступления и обслуживания. Этого может быть недостаточно для моделирования современных мультимедийных сервисов, таких как VR/AR, 8K-видео, тактильный интернет. Поэтому переход к распределению Кокса третьего порядка и следовательно, к использованию системы $C_3/C_3/1$, которая точнее будет аппроксимировать реальный трафик, выглядит наиболее перспективным.

Включение третьей экспоненциальной фазы позволит учитывать кроме средних значений временных интервалов и их дисперсий еще и асимметрию более высокого распределения, что позволит точнее аппроксимировать самоподобные

процессы (Long Range Dependence), которые характерны для видеотрафика 4K/8K, а также всплески трафика. Таким образом, использование системы $C_3/C_3/1$ делает ее более универсальным средством для моделирования любых типов цифрового трафика.

Применение системы $C_3/C_3/1$ предполагает и увеличение вычислительной сложности алгоритма задачи факторизации Винера Хопфа, т.к. в этом случае характеристическое уравнение спектрального метода приводит к полиному шестой степени.

В этом случае также потребуются строгое доказательство того, что ровно три корня будут лежать в левой полуплоскости ($\text{Re}(s) < 0$) комплексной плоскости s , а три – в правой полуплоскости ($\text{Re}(s) > 0$).

Выводы

В работе представлена работоспособная модель массового обслуживания $C_2/C_2/1$ с независимыми распределениями Кокса второго порядка, полученная на основе спектрального метода решения интегрального уравнения Линдли. Построенная модель в отличие от пуассоновских моделей позволяет точнее прогнозировать объемы буферной памяти передающих устройств и показатели качества обслуживания (QoS) в условиях не стационарного и высоко вариативного трафика.

Адекватность модели подтверждена вычислительными экспериментами в сравнении как с близкими системами, описываемыми распределениями в виде вероятностных смесей эрланговских и экспоненциальных распределений, так и аппроксимации Маршала.

Результаты расчетов могут быть востребованы при проектировании инфокоммуникационных сетей, вычислительных кластеров и логистических систем для прогнозирования задержек, и для более точного расчета объемов буферной памяти маршрутизаторов.

Полученные результаты публикуются впервые.

Литература

1. He Q. M., Zhang H. Matrix-Analytic Methods in Queuing Theory: New Developments and Algorithms // Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. 2024. Vol. 152, pp. 45-112.
2. Вишневский В. М., Семенова О. В. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками и фазовым обслуживанием // Автоматика и телемеханика. 2023. Т. 84, № 5. С. 72-94.

3. Самуйлов К. Е., Гайдамака Ю. В. Методы анализа систем 5G/6G с использованием распределений фазового типа // Электро-связь. Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. 2024. Т. 32, № 1. С. 15-30.

4. Nazarov A., Phung-Duc T. Asymptotic Analysis of Queuing Systems with PH-distributions under Heavy Traffic // Communications in Computer and Information Science. 2025. Vol. 1987, pp. 112-125. DOI: 10.1007/978-3-031-52345-2_9.

5. Тарасов В. Н. Анализ и сравнение двух систем массового обслуживания с гиперэрланговскими входными распределениями // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2018. № 4. С. 61-70.

6. Тарасов В. Н., Ахметшина Э. Г. Среднее время ожидания в системе массового обслуживания $M_2/M_2/1$ с запаздыванием // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2018. Т. 22. № 4. С. 702-713.

7. Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф. Спектральные решения для СМО с законами распределений в виде вероятностных смесей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2025. Т. 28, №2. С.87-94. DOI: 18469/1810-3189.2025.28.2.87-94

8. Малахов С. В., Тарасов В. Н. Экспериментальные исследования производительности сегмента программно-конфигурируемой сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. № 2. С. 81-85.

9. Boxma O., Zwart B. Refined Asymptotics for Lindley's Integral Equation with Phase-Type Inputs // Journal of Applied Probability. 2024. Vol. 61, no. 2, pp. 412-435. DOI: 10.1017/jpr.2023.94.

10. Janssen A. J. A Numerical Approach to Lindley's Equation via Rational Approximation // Annals of Operations Research. 2023. Vol. 325, no. 1, pp. 589–614.

11. Abate J., Whitt W. Solving Lindley's Integral Equation via the Transform Inversion Method: The PH/PH/1 Case // Operations Research Letters. 2023. Vol. 51, No. 4, pp. 367-373.

12. Wang L., Smith J. Generalized Lindley's Equation in Non-Stationary Queues with PH-distributions // European Journal of Operational Research. 2026. Vol. 338 (In Press). DOI: 10.1016/j.ejor.2025.08.012.

13. Ozawa T. Stability Conditions for Multi-Server Queues with Phase-Type Service and Markovian Arrivals // Queueing Systems. 2023. Vol. 104, no. 1-2, pp. 83–109. DOI: 10.1007/s11134-023-09791-3.

14. Buchholz P., Kriege J. Effective Approximation of Heavy-Tailed Distributions by Phase-Type Distributions // Performance Evaluation. 2023. Vol. 162, Art. 102357, pp. 1–22.

15. Yuan Z., Chen M. Optimization of PH-distribution fitting via EM-algorithm for 6G Traffic Modeling // Journal of Network and Computer Applications. 2025. Vol. 234, pp. 104–118. (Early Access, Jan 2025).

16. Hurtado-Lange D., Maguluri S. T. A load balancing system in the many-server heavy-traffic asymptotics. August 2022 // Queueing Systems 101(3-4):1-39 DOI:10.1007/s11134-022-09847-7

STUDY OF QUEUEING SYSTEMS WITH PHASE DISTRIBUTIONS

Veniamin N. Tarasov, State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, veniamin_tarasov@mail.ru
Nadezhda N. Bakhareva, State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, nadin1956_04@inbox.ru

Abstract

The paper presents the obtained results of the analysis of general type queueing systems (QS), which are described by the second-order Cox phase distributions $C2/C2/1$. The use of phase distributions in queueing theory has been known for a long time. This class of distributions is suitable as a mathematical apparatus for analyzing teletraffic in future generation networks, which is characterized by high variability and has a self-similarity effect. To find the average waiting time for requirements in the queue, the spectral method was used to solve the Lindley integral equation with finding the zeros and poles of the spectral expansion in the form of a ratio of rational functions, which in this case are reduced to fourth-degree polynomials. This method is less labor-intensive than the classical matrix-geometric method, which uses Kronecker operations and iterations. The paper presents a numerical-analytical model for the average waiting time of requests in a queue for a system with second-order Cox distributions. To assess the accuracy of the obtained solution, computational experiments were conducted for low, medium, and high values of the variation coefficients of time intervals and system load. The obtained data allow us to estimate the performance of switching nodes under increasing stochastic uncertainty in telecom traffic. Consequently, neglecting the phase structure of the distribution laws of the QS when designing highly loaded systems for various purposes leads to an underestimation of packet delays in switching nodes by many times. Comparison with similar systems demonstrates the complete adequacy of the obtained results.

Keywords: Cox phase distributions, queueing systems, spectral method for solving the Lindley equation, variation coefficient, teletraffic

References

- [1] Q. M. He and H. Zhang "Matrix-Analytic Methods in Queueing Theory: New Developments and Algorithms," *Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*, 2024, vol. 152, pp. 45-112.
- [2] V. M. Vishnevskij, O. V. Semenova "Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami i fazovym obsluzhivaniem," *Avtomatika i telemekhanika*, 2023, vol. 84, no. 5, pp. 72-94.
- [3] K. E. Samujlov, YU. V. Gajdamaka "Metody analiza sistem 5G/6G s ispol'zovaniem raspredelenij fazovogo tipa, Elektrosvyaz'," *Vestnik RUDN. Seriya: Matematika. Informatika. Fizika*, 2024, vol. 32, no. 1, pp. 15-30.
- [4] A. Nazarov, T. Phung-Duc "Asymptotic Analysis of Queueing Systems with PH-distributions under Heavy Traffic," *Communications in Computer and Information Science*, 2025, vol. 1987, pp. 112-125. DOI: 10.1007/978-3-031-52345-2_9
- [5] V. N. Tarasov "Analysis and comparison of two queueing systems with hypererlangian input distributions," *Radio Electronics Computer Science Control*, 2018, vol. 47, no.4, pp. 61-70. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-6
- [6] V. N. Tarasov, E. G. Ahmetshina "Srednee vremya ozhidaniya v sisteme massovogo obsluzhivaniya H2/H2/1 s zapazdyvaniem," *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2018, vol. 22, no.4, pp. 702-713.
- [7] V. N. Tarasov, N. F. Bahareva "Spektral'nye resheniya dlya SMO s zakonami raspredelenij v vide veroyatnostnyh smesey," *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2025, vol. 28, no.2, pp. 87-94. DOI: 10.18469/1810-3189.2025.28.2.87-94
- [8] S. V. Malahov, V. N. Tarasov "Eksperimental'nye issledovaniya proizvoditel'nosti segmenta programmno-konfiguriruemoy seti," *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2013, no. 2, pp. 81-85.
- [9] O. Boxma, B. Zwart "Refined Asymptotics for Lindley's Integral Equation with Phase-Type Inputs," *Journal of Applied Probability*, 2024, vol. 61, no. 2, pp. 412-435. DOI: 10.1017/jpr.2023.94
- [10] A. J. Janssen "A Numerical Approach to Lindley's Equation via Rational Approximation," *Annals of Operations Research*, 2023, vol. 325, no. 1, pp. 589-614.
- [11] J. Abate, W. Whitt "Solving Lindley's Integral Equation via the Transform Inversion Method: The PH/PH/1 Case," *Operations Research Letters*, 2023, vol. 51, no. 4, pp. 367-373.
- [12] L. Wang, J. Smith "Generalized Lindley's Equation in Non-Stationary Queues with PH-distributions," *European Journal of Operational Research*, 2026, vol. 338 (In Press). DOI: 10.1016/j.ejor.2025.08.012
- [13] T. Ozawa "Stability Conditions for Multi-Server Queues with Phase-Type Service and Markovian Arrivals," *Queueing Systems*, 2023, vol. 104, no. 1-2, pp. 83-109. DOI: 10.1007/s11134-023-09791-3
- [14] P. Buchholz, J. Kriege "Effective Approximation of Heavy-Tailed Distributions by Phase-Type Distributions," *Performance Evaluation*, 2023, vol. 162, Art. 102357, pp. 1-22.
- [15] Z. Yuan, M. Chen "Optimization of PH-distribution fitting via EM-algorithm for 6G Traffic Modeling," *Journal of Network and Computer Applications*, 2025, vol. 234, pp. 104-118. (Early Access, Jan 2025).
- [16] D. Hurtado-Lange, S. T. Maguluri "A load balancing system in the many-server heavy-traffic asymptotics," *August. Queueing Systems*, 101(3-4):1-39 DOI:10.1007/s11134-022-09847-7

Information about authors:

Veniamin N. Tarasov, Professor of the Department of Computer Science and Robotic Systems, Povolzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara, Russia. ORCID: 0000-0002-9318-0797

Nadezhda N. Bakhareva, Professor of the Department of Computer Science and Robotic Systems, Povolzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara, Russia. ORCID: 0000-0002-9850-7752

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ВУЗОМ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-55-62

Грачев Михаил Иванович,
Санкт-Петербургский университет МВД России,
Санкт-Петербург, Россия, mig2500@mail.ru

Manuscript received 12 April 2026;
Accepted 14 June 2026

Бурлов Вячеслав Георгиевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
burlovvg@mail.ru

Грачева Наталья Геннадьевна,
Санкт-Петербургский университет МВД России,
Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов управления вузом, решение, критерии эффективности, цифровая трансформация образования, технологическое прогнозирование

В условиях цифровой трансформации образования повышается сложность управления технологическими процессами в высших учебных заведениях, что требует внедрения научно-обоснованных подходов к их автоматизации. Цель исследования заключается в разработке и формализации методологии автоматизации технологических процессов управления вуза, обеспечивающей достижение заданных показателей качества образовательной деятельности при оптимизации ресурсов. Основная задача статьи - представить адаптированную модель решения и алгоритм его поиска для задач автоматизации учебно-методических и административных процессов. Методы исследования включают системный анализ, методы анализа и синтеза, методы сетевого моделирования и формализацию построения модели решения с применением дифференциальных уравнений Колмагорова. Новизна работы заключается в переносе принципов системного проектирования из области машиностроения в сферу управления образованием, их адаптации и построении формализованной модели решения для автоматизации вуза. Результаты исследования представлены в виде структурированной методологии, включающей анализ источников литературы основанных на вербальной модели автоматизации и полученное формализованное решение, а также полученный показатель эффективности реализации решения. Предлагаемый подход позволяет перевести процесс повышения эффективности работы вуза на системную основу, обеспечивая комплексный учет образовательных, технологических и экономических требований на этапе принятия решений, что способствует повышению уровня осведомленности обучающихся в образовательной организации.

Информация об авторах:

Грачев Михаил Иванович, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Санкт-Петербургский университет МВД России, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0002-0338-3049

Бурлов Вячеслав Георгиевич, профессор высшей школы техносферной безопасности, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Грачева Наталья Геннадьевна, преподаватель кафедры русского языка, Санкт-Петербургский университет МВД России, Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0003-1563-1393

Для цитирования:

Грачев М.И., Бурлов В.Г., Грачева Н.Г. Системный подход к автоматизации технологических процессов управления вузом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 55-62.

For citation:

Grachev M.I., Burlov V.G., Gracheva N.G. A systems approach to automation of technological processes in university management," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 7, pp. 55-62. (in Russian)

Введение

Актуальной проблемой современного высшего образования является поиск методологии, позволяющей проводить эффективную автоматизацию технологических процессов управления, позволяющих повышать эффективность образовательных процессов. Стремительная цифровизация, рост требований к качеству и гибкости образовательных услуг, а также необходимость оптимизации административных затрат диктуют потребность в переходе от фрагментарного внедрения информационных систем к целостному, системно спроектированному и целенаправленному их внедрению в контур управления вуза. Данная проблема усугубляется отсутствием универсальных методик, позволяющих корректно связать педагогические и управленческие цели с конкретными технологическими решениями в области информатизации и как следствие повышения эффективности работы вуза в целом.

В отечественной и зарубежной литературе вопросы автоматизации различных направлений деятельности рассматривались такими авторами, как: Taylor J. [1], Huang H. [2], Aliyev A. G. [3], Bhardwaj V. [4], Борисов К. Д. [5], Sinenko S. [6], Антонов Е. К. [7], Анисимов П. Ф. [8], Шевчук Е. В., Шпак А. В. [9], Сушанский А. С., Шевель П. П. [10], Ван С., Ван Б. [11], Fernández A., Gómez B., Binjaku K., Meçe E. [12], Katsamakas E., Pavlov O. V., Saklad R. [13], Donglin C. [14] и другими.

В работе Taylor J. предлагается рамочная модель системного подхода к проектированию крупных управленческих систем, данная статья полезна как методологическая база для итеративного проектирования [1].

В работе Huang H. описана эмпирическая разработка и испытание модульной платформы для управления студентами с описанием алгоритмов интеграции данных и нейросетевых компонентов для аналитики [2].

В работе Aliyev A.G. представлены методические рекомендации по формированию организационно-технологических структур предприятий на базе цифровых платформ, которые могут быть адаптированы к вузам [3].

Bhardwaj V. проводит анализ применения роботизированных автоматизированных процессов в образовательной сфере, оценка выгод и рисков при автоматизации административных процессов, службы поддержки учащихся и методики преподавания [4].

Борисов К. Д. исследует потенциал цифровых технологий в социально-трудовой сфере вузов и анализирует показатели и влияние на управленческие практики. По итогам анализа приходит к выводу, «что сфера высшего образования имеет большой потенциал внедрения цифровых технологий в организационные и социально-трудовые процессы посредством создания цифровой платформы управления на федеральном уровне» [5].

В работе Sinenko S. рассматривается строительная сфера, но статья содержит методики выбора организационно-технологического решения, применимые в адаптированном виде при проектировании автоматизированной системы управления (АСУ) вуза [6].

Антонов Е.К. рассматривает модель управления вузом с учётом цифровизации, включая маркетинговые и управленческие подходы в новых условиях внедрения искусственного интеллекта во все фазы маркетингового цикла, которые могут

быть применены для оптимизации процессов управления вуза [7].

Анисимов П.В. проводит исследование оптимизации управленческих систем вузов в условиях цифровизации, применение системного анализа и ИТ-решений для повышения качества управления [8].

Авторы Шевчук Е. В. и Шпак А. В. на основе отечественного и зарубежного опыта представляют в своей работе методологию цифровой трансформации бизнес-процессов в вузе с акцентом на управление качеством [9].

Другие авторы Сушанский А. С. и Шевель П. П. проводят анализ проблем и вызовов при цифровизации образовательной среды вузов на примере российского высшего образования, а также выявляют барьеры и факторы, влияющие на успешную автоматизацию [10].

Ван С., Ван Б. проводят анализ цифровой трансформации систем управления в китайских вузах, оценку тенденций, инфраструктурных и организационных изменений, связанных с цифровизацией образования [11].

Fernández A., Gómez B., Binjaku K., Meçe E. проводят обзор инициатив цифровой трансформации в вузах — от внедрения ИТ до перестройки организационных и человеческих процессов, с выделением стратегий, технологий и барьеров [12].

Katsamakas E., Pavlov O. V., Saklad R. предлагают системный подход к внедрению ИИ в управление вузами, строят диаграмму причинно-следственных связей, отражающую динамику изменений, риски и возможности цифровой трансформации [13].

Авторы Chen D., Shi C. провели эмпирическое исследование по цифровизации финансовых систем управления в вузах и проанализировали преимущества и вызовы при переходе к платформенным системам финансового управления.

Существующие подходы зачастую носят описательный характер или сосредоточены на технических аспектах, упуская из виду системные взаимосвязи между содержанием процессов и средствами их автоматизации. Это приводит к неэффективным инвестициям, низкой интеграции систем и сопротивлению изменениям со стороны пользователей [15].

Для решения обозначенной проблемы в статье предлагается адаптация и развитие аппарата системного подхода, успешно применяемого в технических отраслях, к специфике образовательной организации [16].

В качестве теоретической основы используются принципы системности, теория принятия решений и методология технологического прогнозирования. Целью статьи является формирование структурированного подхода к проектированию АСУ вуза, позволяющего на методологическом уровне обосновывать выбор и внедрение организационно-технологических решений.

Исследование построено на методологии прикладного системного анализа. План работы включал следующие этапы:

- 1) анализ проблематики автоматизации управления в вузах и выявление недостатков эмпирических подходов;
- 2) адаптация концептуального аппарата системного проектирования (цели, альтернативы, модели, критерии) из технической области в гуманитарно-управленческую (сферу образования);
- 3) формализация ключевых понятий — «решение» и процесса его поиска;

4) разработка математической модели, устанавливающей связи между базовыми процессами рассматриваемой системы;

5) определение системы критериев оценки эффективности решений, через показатель эффективности реализации решения.

Проблема повышения эффективности управления социально-экономическими системами, к которым относятся и высшие учебные заведения (вузы), традиционно является центральной для теории и практики менеджмента.

В условиях технологического развития и цифровой трансформации всех сфер жизни данная проблема приобретает новое значение. Интеграция информационных технологий в образовательный и административный процессы, с одной стороны, открывает возможности для оптимизации, а с другой – усложняет среду принятия решений для руководства вуза, увеличивая нагрузку и требуя новых инструментов анализа.

Задача построения адекватной математической модели процесса выработки решения, способной учитывать изменчивость условий, влияние человеческого фактора и потенциал автоматизированных систем, представляется актуальным направлением исследований. Существующие подходы к управлению вузом, часто сосредоточены на анализе и оптимизации отдельных аспектов: использовании информационно-коммуникационных технологий, стратегическом развитии, оценке эффективности или процессном подходе. Несмотря на свою ценность, эти методы преимущественно носят аналитический или описательный характер.

Предлагаемый в данной статье синтетический подход направлен на формализацию самого процесса реализации решения [17]. Его цель – не только проанализировать сложившуюся ситуацию, но и синтезировать модель, позволяющую проектировать управление организационной системой с заранее заданными свойствами и гарантированной вероятностью достижения цели. Такой подход восполняет методологический пробел, актуальный в контексте перехода от «лоскутной» автоматизации к построению целостных, но гибких информационных систем управления в целом.

1 Материалы, модели и методы

В основе методологии исследования лежит естественно-научный подход (ЕНП), трактуемый как единство свойств мышления человека, закономерностей окружающего мира и процесса их познания.

Методологической базой является закон сохранения целостности объекта (ЗСЦО), фиксирующий устойчивую взаимосвязь свойств объекта, его действий при фиксированном предназначении. Для синтеза модели применяются методы декомпозиции, абстрагирования и агрегирования.

Исследование базируется на принципах ведущей научной школы «Системная интеграция процессов государственного управления» и развивает идеи теории функциональных систем П.К. Анохина [18], акцентируя внимание на целостности, результативности и системообразующем факторе.

Ключевым объектом моделирования выступает решение ЛПР, рассматриваемое как целостный процесс, развертывающийся на трех взаимосвязанных уровнях: методическом, методологическом и технологическом.

На методологическом уровне формируются условия существования процесса управления.

На методическом уровне формируются причинно-следственные связи и программы деятельности.

На технологическом уровне формируется алгоритмическая реализация воздействий.

Исходным понятием для декомпозиции является решение, определяемое как условие реализации предназначения объекта управления в данной обстановке. Данное понятие раскладывается на три базовых элемента: «обстановка» (поток проблем), «информационно-аналитическая работа» (идентификация проблем) и «решение» (нейтрализация проблем).

Для перехода к динамической модели используются следующие предположения и допущения, без которых процесс формирования модели решения может не состояться:

1. Поток проблем во внешней среде близок к простейшему (пуассоновскому) с интенсивностью $\lambda = 1/\Delta t_{\text{ин}}$, где $\Delta t_{\text{ин}}$ – среднее время между возникновением проблем в рассматриваемой системе.

2. Среднее время идентификации проблемы $\Delta t_{\text{ин}}$ и среднее время нейтрализации проблемы $\Delta t_{\text{н}}$ – случайные величины.

3. Система предназначена для оценки потенциальных возможностей ЛПР в условиях ограниченности временных ресурсов и ресурсов обстановки.

В основе синтеза математической модели решения лежит системообразующий фактор (СОФ), базирующийся на ЗСЦО. Для получения модели решения применяется граф состояний рассматриваемой системы, из которого на основе применения системы дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена получаем математическую модель решения, рисунок 1 [19].

Развитие цифровой образовательной среды требует перехода от фрагментарного внедрения информационных систем к системному проектированию автоматизации управления вузом. В этой связи важным этапом исследования является формирование концептуальной модели автоматизации технологических процессов управления.

Под автоматизацией технологических процессов управления вузом предлагается понимать целенаправленное внедрение информационных и аналитических инструментов, обеспечивающих снижение временных затрат на обработку управленческой информации, повышение обоснованности принимаемых решений и повышение эффективности функционирования образовательной организации.

Системный подход предполагает рассмотрение автоматизации не как внедрение отдельных программных продуктов, а как комплексную трансформацию управленческой системы, включающую:

- информационные процессы;
- организационные процессы;
- аналитические процессы;
- процессы принятия управленческих решений.

С позиции системного анализа управление вузом может быть представлено в виде совокупности взаимосвязанных подсистем:

- образовательная подсистема;
- административно-управленческая подсистема;
- научно-исследовательская подсистема;
- финансово-экономическая подсистема;
- информационно-аналитическая подсистема.

Автоматизация данных подсистем должна обеспечивать формирование единого информационного пространства образовательной организации, в котором управленческие решения принимаются на основе объективных данных и аналитических моделей.

Предлагаемая методология автоматизации базируется на трех ключевых принципах:

1. Принцип системности – автоматизация должна охватывать взаимосвязанные процессы управления.
2. Принцип адаптивности – система должна учитывать специфику образовательной организации.
3. Принцип эффективности – внедрение технологий должно приводить к измеримому росту показателей эффективности управления.

Автоматизация управления вузом должна рассматриваться как процесс системного проектирования организационно-технологической структуры управления, в рамках которого формируются модели принятия решений, алгоритмы обработки информации и показатели эффективности функционирования системы, рисунок 1.

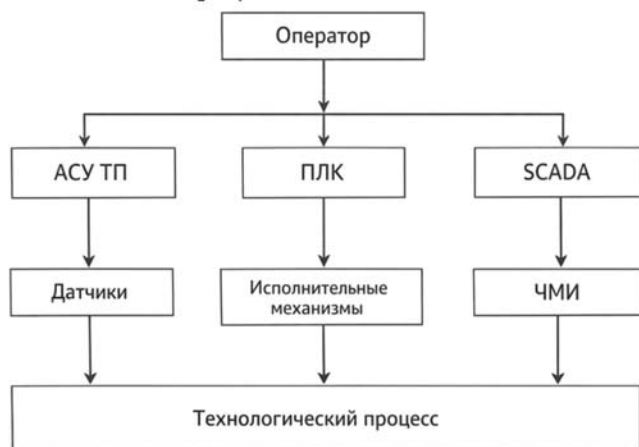


Рис. 1. Структурная модель автоматизации процессов управления вузом

На рисунке 1 представлены следующие сокращения и обозначения:

- АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом. Это комплекс программных и технических средств, предназначенных для автоматизации управления и контроля технологических процессов;
- ПЛК – программируемый логический контроллер. Микропроцессорное устройство, выполняющее алгоритмы управления оборудованием и исполнительными механизмами;
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (система диспетчерского управления и сбора данных). Программная система, предназначенная для визуализации технологических процессов, мониторинга параметров и управления объектами;
- ЧМИ – человеко-машинный интерфейс (HMI – Human Machine Interface). Средства взаимодействия оператора с автоматизированной системой управления;
- датчики – измерительные устройства, фиксирующие параметры технологического процесса (температура, давление, состояние системы и др.);

– исполнительные механизмы – устройства, реализующие управляющие воздействия системы (приводы, клапаны, реле, электродвигатели и т.д.);

– технологический процесс – совокупность операций и процедур, реализующих основную деятельность управляемой системы.

Разработанная структурная модель автоматизации процессов управления вузом отражает взаимосвязь между потоками управленческой информации, процессами ее обработки и механизмами принятия решений.

Модель включает следующие основные элементы:

- поток проблем внешней и внутренней среды;
- систему мониторинга и идентификации проблем;
- систему аналитической обработки информации;
- систему принятия управленческих решений;
- систему реализации управленческих воздействий.

Информационные потоки в данной модели обеспечивают циркуляцию данных между функциональными подсистемами вуза. При этом автоматизация направлена на сокращение времени обработки информации и повышение точности управленческих решений.

2 Результаты

В результате синтеза предложена концептуальная структурная схема управленческого решения как информационно-управляющей системы, связывающая три потока: возникновения проблем в системе ($\lambda = 1/\Delta t_{\text{пр}}$), их идентификации ($v_1 = 1/\Delta t_{\text{ин}}$) и нейтрализации ($v_2 = 1/\Delta t_{\text{нп}}$): $P_2 = f(\lambda, v_1, v_2)$, где P_2 – показатель эффективности реализации решения.

Условием адекватного функционирования системы является выполнение неравенства, гарантирующего, что система успевает обрабатывать поступающие проблемы: $\Delta t_{\text{пр}} / \Delta t_{\text{нп}} + \Delta t_{\text{ин}} / \Delta t_{\text{нп}} \leq 1$.

Граф состояний процесса формирования решения представлен на рисунке 2.

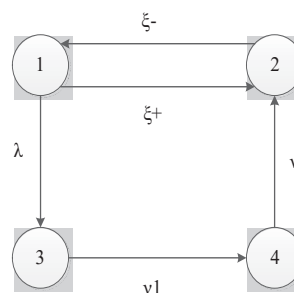


Рис. 2. Граф состояний процесса формирования решения

В качестве интегрального показателя эффективности реализации решения предложена вероятность того, что возникшая проблема будет своевременно распознана и нейтрализована.

В статическом представлении этот показатель выражается формулой (1):

$$P_2 = \frac{\xi^+ v_1 v_2 + \lambda v_1 v_2}{v_1 v_2 \xi^- + \xi^+ v_1 v_2 + \lambda v_1 v_2 + \lambda v_2 \xi^- + \lambda v_1 \xi^-} \quad (1)$$

Для динамического анализа процесс формирования решения представлен как Марковский процесс с четырьмя состояниями, отражающими комбинации выполнения функций идентификации и нейтрализации: P_1 (обе функции не выполняются), P_3 (идет идентификация), P_4 (идет нейтрализация), P_2 (выполняются обе функции).

Стационарные вероятности нахождения системы в этих состояниях находятся из системы линейных алгебраических уравнений, выведенной из уравнений Колмогорова–Чепмена.

Важным результатом является интеграция факторов влияния в модель. Среднее время идентификации ($\Delta t_{ин}$) и нейтрализации ($\Delta t_{нп}$) представлены как сумма вкладов человеческого фактора (ЧФ) и технической оснащенности (ТО): $\Delta t_{ин} = \Delta t_{ин}^{чф} + \Delta t_{ин}^{то}$ и $\Delta t_{нп} = \Delta t_{нп}^{чф} + \Delta t_{нп}^{то}$, где $\Delta t^{то} \leq 0$, так как внедрение ИТ сокращает временные затраты.

Таким образом, итоговая модель устанавливает функциональную зависимость: $P_2 = f(\Delta t_{ин}, \Delta t_{ин}^{чф} + \Delta t_{ин}^{то}, \Delta t_{нп}^{чф} + \Delta t_{нп}^{то})$.

Практический расчет показателя эффективности реализации решения представлен в таблице 1.

При сокращении времени идентификации и нейтрализации проблем, возникающих в системе управления образовательными процессами вуза задействуются технические резервы для автоматизации имеющихся технических средств и для проведения подготовки (переподготовки) имеющегося личного состава, что, согласно таблице, приводит к сокращению времени реализации решения.

Таблица 1

Практический расчет показателя эффективности реализации решения

Сценарий	$\Delta t_{ин}$ (недели)	$\Delta t_{нп}$ (недели)	$\Delta t_{ин}$ (недели)	Результат P_2	Интерпретация
1	1,0	0,125	0,125	0,80	Управление осуществляется с высокой гарантией
2	1,0	0,111	0,111	0,82	Повышение оперативности ведет к росту эффективности

Процесс выбора направлений по автоматизации технологических процессов управления вузом направлен на его основные процессы взаимодействия, через используемые технологии (программно-аппаратные комплексы) с целью ожидаемого эффекта взаимодействия между подразделениями направленным на повышение их эффективности. Такое состояние системы, на которую влияют внедряемые в контур управления информационные технологии и другие различные технические решения можно представить таблицей 2.

Где под LMS-системами понимаются системы управления обучением, представляющие собой программные платформы, предназначенные для организации, сопровождения и контроля образовательного процесса в цифровой среде. LMS-системы обеспечивают размещение учебных материалов, управление учебными курсами, проведение тестирования, контроль успеваемости обучающихся, а также

взаимодействие между преподавателями и обучающимися в электронной образовательной среде.

Таблица 2

Основные направления автоматизации процессов управления вузом

Направление автоматизации	Основные процессы	Используемые технологии	Ожидаемый эффект
управление образовательным процессом	планирование учебных планов, учет успеваемости	LMS-системы, аналитика данных	повышение качества образовательного процесса
управление административной деятельностью	документооборот, кадровый учет	электронный документооборот	сокращение времени обработки документов
управление научной деятельностью	учет публикаций, управление проектами	научные базы данных, цифровые платформы	повышение эффективности научных исследований
финансовое управление	планирование бюджета, контроль расходов	ERP-системы	повышение прозрачности финансов

Аналитика данных – совокупность методов и инструментов обработки и анализа больших объемов информации, направленных на выявление закономерностей, тенденций и факторов, влияющих на эффективность деятельности организации.

В системе управления вузом аналитика данных применяется для анализа успеваемости обучающихся, мониторинга образовательных программ, оценки эффективности управленческих решений и прогнозирования развития образовательных процессов.

ERP-системы – системы планирования ресурсов организации, представляющие собой интегрированные информационные системы, предназначенные для управления основными ресурсами организации: финансовыми, кадровыми, материальными и организационными. В условиях высшего учебного заведения ERP-системы используются для автоматизации финансового управления, планирования бюджета, учета кадровых ресурсов, управления закупками и контроля административно-хозяйственной деятельности.

Анализ направлений автоматизации процессов управления вузом показывает, что наибольший эффект достигается при комплексном внедрении информационных технологий во все основные подсистемы управления. При этом важным условием эффективности автоматизации является интеграция информационных систем и обеспечение единого информационного пространства образовательной организации.

Практическая реализация предложенной модели автоматизации технологических процессов управления вузом предполагает поэтапное внедрение информационно-аналитических систем.

На первом этапе осуществляется диагностика текущего состояния управленческих процессов. Анализируются временные характеристики обработки информации, выявляются узкие места в системе управления и определяются процессы, требующие автоматизации.

На втором этапе проводится проектирование архитектуры автоматизированной системы управления. В рамках данного этапа определяются:

- структура информационных потоков;
- требования к программным средствам;
- алгоритмы обработки управленческой информации.

На третьем этапе осуществляется внедрение автоматизированных систем и их интеграция в существующую управленческую инфраструктуру вуза. Особое внимание при этом уделяется подготовке персонала и адаптации организационных процессов к новым технологическим условиям.

На заключительном этапе проводится оценка эффективности внедренных решений. В качестве основного критерия эффективности используется показатель вероятности успешной реализации управленческого решения P_2 , отражающий способность системы своевременно идентифицировать и нейтрализовать возникающие проблемы.

Использование предложенной аналитико-динамической модели позволяет количественно оценивать влияние различных факторов на эффективность управления вузом. В частности, модель дает возможность анализировать влияние:

- уровня автоматизации процессов управления;
- квалификации управленческого персонала;
- скорости обработки информации;
- сложности внешней среды.

Предложенный системный подход создает методологическую основу для проектирования и развития цифровых систем управления образовательными организациями.

3 Выводы

Разработанная аналитико-динамическая модель представляет собой инструмент синтеза управленческого процесса, а не только его анализа. Она формализует ключевую для современных вузов проблему балансировки между возрастающей сложностью и изменчивостью внешней и внутренней среды и ограниченными ресурсами на ее мониторинг и реагирование (v_1, v_2).

Модель демонстрирует, что эффективность управления (P_2) нелинейно зависит от соотношения этих параметров, что подтверждает необходимость системного подхода к автоматизации.

Новизна подхода заключается в явном учете и разделении вклада человеческого и технологического факторов в общее время цикла управления. Это позволяет проводить адресную оценку последствий внедрения новых информационных систем (снижающих Δt^{TO}) или программ развития управленческих компетенций (снижающих $\Delta t^{\text{ЧФ}}$).

Такой подход согласуется с идеей двухконтурной автоматизации, где типовые решения (внешний контур) должны быть гармонизированы с индивидуальными особенностями управления конкретным вузом (внутренний контур).

Практическая ценность модели заключается в ее аналитическом и вычислительном потенциале. На этапе диагностики, путем фиксации средних временных показателей, можно количественно оценить текущую эффективность процесса принятия решения в вузе.

На этапе проектирования, по полученным данным задавая целевое значение P_2 и анализируя сложившуюся обстановку ($\Delta t_{\text{ин}}$), можно вычислить требования к необходимой

производительности подразделений мониторинга ($\Delta t_{\text{мон}}$) и реализации решений ($\Delta t_{\text{ин}}$), обосновывая тем самым потребность в конкретных организационных или технологических изменениях.

Таким образом, разработанная аналитико-динамическая модель управленческого решения позволяет не только оценивать текущую эффективность управления вуза, но и целенаправленно проектировать его автоматизацию.

Модель формализует процесс принятия решений как взаимосвязанную систему, где ключевыми параметрами выступают среднее время между возникновением проблем ($\Delta t_{\text{мон}}$), их идентификацией ($\Delta t_{\text{ин}}$) и нейтрализацией ($\Delta t_{\text{ин}}$).

Критически важным является то, что последние два параметра представлены как сумма вкладов человеческого фактора и технической оснащённости: $\Delta t_{\text{ин}} = \Delta t_{\text{ин}}^{\text{ЧФ}} + \Delta t_{\text{ин}}^{\text{ТО}}$.

Этот подход напрямую отвечает на вызовы, обозначенные в исследованиях по цифровой трансформации высшего образования, в частности, на проблемы сокращения численности обучающихся.

Предложенная модель предоставляет инструмент для количественной оценки того, как именно внедрение цифровых технологий (сокращающих $\Delta t^{\text{ТО}}$) или развитие управленческих компетенций персонала (сокращающих $\Delta t^{\text{ЧФ}}$) влияют на общий показатель эффективности P_2 . Это позволяет руководству вуза принимать обоснованные, экономически выверенные решения о распределении ограниченных ресурсов между ИТ-инфраструктурой и кадровым развитием.

Интегральный показатель эффективности P_2 служит универсальным критерием для диагностики текущего состояния системы управления, рассмотренной в статье, и для проектирования её будущего состояния. Задавая целевое значение P_2 , можно рассчитать необходимые временные характеристики подразделений мониторинга и реализации решений, тем самым обеспечивая системную связь между стратегическими целями вуза и тактическими мерами по его цифровой трансформации. В конечном счёте, данная модель способствует переходу от фрагментарной автоматизации к созданию целостной, гибкой и эффективной системы управления, ориентированной на гарантированное достижение образовательных и управленческих целей.

Литература

1. Taylor J. Systems approach to modern management: a proposed framework // *Procedia / ScienceDirect*. 2025.
2. Huang H. Design and implementation of student management system // *Scientific Reports*. 2024.
3. Aliyev A. G. A conceptual approach to developing the organizational-technological structure // *International Journal of Engineering and Management Education (IJEME)*. 2025.
4. Bhardwaj V. Transforming higher education with robotic process automation // *Environmental, Social and Governance (ESG) journal*. 2025.
5. Борисов К. Д. Потенциал внедрения цифровых технологий в социально-трудовые отношения в сфере высшего образования // *Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление*. 2025. №1 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potentsial-vnedreniya-tsifrovyyh-tehnologiy-v-sotsialno-trudovye-otnosheniya-v-sfere-vysshego-obrazovaniya> (дата обращения: 18.12.2025).

6. *Sinenko S.* Selection of Organizational and Technological Solutions for Construction // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island, 10-12 декабря 2019 года. Vol. 459, 5, Chapter 4. Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 052043. DOI 10.1088/1755-1315/459/5/052043. EDN RBMIBW.

7. *Антонов Е. К.* Модель маркетингового управления вузом в эпоху цифровизации: опыт России 2024-2025 гг // Журнал монетарной экономики и менеджмента. 2025. № 5. С. 191-195. DOI 10.26118/2782-4586.2025.91.15.082. EDN NPCRXR.

8. *Анисимов П. Ф.* Анализ и оптимизация системы качественного управления высшим учебным заведением в контексте цифровизации образовательного процесса в России // Управление образованием: теория и практика. 2023. № 11-2(71). С. 136-143. DOI 10.25726/y1057-8550-0035-m. EDN CAWRQA.

9. *Шевчук Е. В., Шпак А. В.* Цифровая трансформация управления качеством образовательных бизнес-процессов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2023. Т. 20, № 2. С. 159-175. DOI 10.22363/2312-8631-2023-20-2-159-175. EDN JQUMLD.

10. *Сушанский А. С., Шевель П. П.* Цифровизация образовательной среды системы высшего образования // Среднерусский вестник общественных наук. 2023. Т. 18, № 1. С. 87-108. DOI 10.22394/2071-2367-2023-18-1-87-108. EDN KBSKAV.

11. *Ван С., Ван Б.* Управление высшим образованием в Китае в условиях цифровой трансформации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Социология. 2025. Т. 25, № 1. С. 203-213. DOI 10.22363/2313-2272-2025-25-1-203-213. EDN EGZICJ.

12. *Fernández A., Gómez B., Binjaku K., Meçe E. K.* Digital transformation initiatives in higher education institutions: A multivocal literature review // Education and Information Technologies. 023. Vol. 28, No. 10, pp. 12351-12382. DOI 10.1007/s10639-022-11544-0. EDN EGDMP.

13. *Katsamakos E., Pavlov O. V., Saklad R.* Artificial Intelligence and the Transformation of Higher Education Institutions: A Systems

Approach // Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 14. P. 6118. DOI 10.3390/su16146118. EDN BQTCCQ.

14. *Chen D., Shi Ch.* Practice and Reflection on the Transformation of Performance-Oriented Higher Education Financial Digitization Platform // Advances in Economics, Management and Political Sciences. 2024. Vol. 91, No. 1, pp. 72-83. DOI 10.54254/2754-1169/91/20240962. EDN GEEGXH.

15. *Прудников В. А.* Развитие методологии общей постановки математической проектной задачи по нахождению конструктивно-технологических решений в задачах системного проектирования и технологической подготовки производств общего машиностроения // Проблемы современной науки и образования. 2012. № 12(12). С. 41-48. EDN UDYCAF.

16. *Грачев М. И.* Модель автоматизации процессов управления вузом // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51, № 4. С. 60-70. DOI 10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70. EDN CANLFR.

17. *Грачев М. И., Бурлов В. Г.* Системообразующий фактор автоматизации процессов управления в организационных системах // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4(39). С. 21-31. DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.13.94.002. EDN OVSUBG.

18. *Анохин П. К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Избранные труды. М.: Наука, 1971. 61 с.

19. *Бурлов В. Г., Грачев М. И.* Аналитическо-динамическая модель управленческого решения в социально-экономических системах на примере руководителя учебного заведения высшего образования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13, № 10. С. 27-34. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10314. EDN SNJZQR.

20. *Грачев М. И., Бурлов В. Г.* Человеческий фактор в принятии управленческих решений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 3. С. 27-33. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-3-27-33. EDN QSIBQT.

A SYSTEMATIC APPROACH TO AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF UNIVERSITY MANAGEMENT

Mikhail I. Grachev, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, St. Petersburg, Russia, mig2500@mail.ru

Vyacheslav G. Burlov, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, burlovvg@mail.ru

Natalya G. Gracheva, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, St. Petersburg, Russia

Abstract

In the context of the digital transformation of education, the complexity of managing technological processes in higher education institutions is increasing, which requires the implementation of scientifically based approaches to their automation. The purpose of the study is to develop and formalize a methodology for the automation of technological management processes (ATMP) of a university, ensuring the achievement of the specified quality indicators of educational activities while optimizing resources. The main objective of the article is to present an adapted solution model and an algorithm for finding it for the problems of automating educational, methodological, and administrative processes. The research methods include system analysis, methods of analysis and synthesis, methods of network modeling, and formalization of the construction of a solution model using Kolmogorov differential equations. The novelty of the work lies in the transfer of system design principles from the field of mechanical engineering to the field of education management, their adaptation, and the construction of a formalized solution model for the automation of a university. The results of the study are presented in the form of a structured methodology, including an analysis of literary sources based on a verbal automation model and the resulting formalized solution, as well as the obtained indicator of the effectiveness of the solution implementation. The proposed approach allows for a systemic approach to improving the efficiency of a university, ensuring a comprehensive consideration of educational, technological, and economic requirements at the decision-making stage, thereby raising the level of awareness among students within the educational organization.

Keywords: automation of technological processes of university management, solution, performance criteria, digital transformation of education, technological forecasting

References

- [1] J. Taylor, "Systems approach to modern management: a proposed framework," *Procedia / ScienceDirect*. 2025.
- [2] H. Huang, "Design and implementation of student management system," *Scientific Reports*. 2024.
- [3] A. G. Aliyev, "A conceptual approach to developing the organizational-technological structure," *International Journal of Engineering and Management Education (IJEME)*. 2025.
- [4] V. Bhardwaj, "Transforming higher education with robotic process automation," *Environmental, Social and Governance (ESG) journal*. 2025.
- [5] K. D. Borisov, "Potential of implementing digital technologies in social and labor relations in higher education," *Bulletin of the Moscow University named after S. Yu. Witte. Series 1: Economics and Management*. 2025. No. 1 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potentsial-vnedreniya-tsifrovyyh-tehnologiy-v-sotsialno-trudovye-otnosheniya-v-sfere-vysshego-obrazovaniya> (accessed: 18.12.2025).
- [6] S. Sinenko, "Selection of Organizational and Technological Solutions for Construction," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience"*, Russky Island, December 10-12, 2019. Vol. 459, 5, Chapter 4. Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 052043. DOI 10.1088/1755-1315/459/5/052043.
- [7] E. K. Antonov, "A Model of University Marketing Management in the Digital Age: Russia's Experience in 2024-2025," *Journal of Monetary Economics and Management*. 2025. No. 5, pp. 191-195. DOI 10.26118/2782-4586.2025.91.15.082.
- [8] P. F. Anisimov, "Analysis and optimization of the quality management system of a higher educational institution in the context of digitalization of the educational process in Russia," *Education Management: Theory and Practice*. 2023. No. 11-2 (71), pp. 136-143. DOI 10.25726 / y1057-8550-0035-m.
- [9] E. V. Shevchuk, A. V. Shpak, "Digital transformation of quality management of educational business processes," *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Informatization of Education*. 2023. Vol. 20, No. 2, pp. 159-175. DOI 10.22363/2312-8631-2023-20-2-159-175.
- [10] A. S. Sushansky, P. P. Shevel, "Digitalization of the educational environment of the higher education system," *Central Russian Bulletin of Social Sciences*. 2023. Vol. 18, No. 1, pp. 87-108. DOI 10.22394/2071-2367-2023-18-1-87-108.
- [11] S. Wang, B. Wang, "Higher education management in China in the context of digital transformation," *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Sociology*. 2025. T. 25, No. 1, pp. 203-213. DOI 10.22363/2313-2272-2025-25-1-203-213.
- [12] A. Fernandez, B. Gomez, K. Binjaku, E. K. Mece, "Digital transformation initiatives in higher education institutions: A multivocal literature review," *Education and Information Technologies*. 2023. Vol. 28, No. 10, pp. 12351-12382. DOI 10.1007/s10639-022-11544-0.
- [13] E. Katsamakos, O. V. Pavlov, R. Saklad, "Artificial Intelligence and the Transformation of Higher Education Institutions: A Systems Approach," *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 14, pp. 6118. DOI 10.3390/su16146118.
- [14] D. Chen, Ch. Shi, "Practice and Reflection on the Transformation of Performance-Oriented Higher Education Financial Digitization Platform," *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2024. Vol. 91, No. 1, pp. 72-83. DOI 10.54254/2754-1169/91/20240962.
- [15] V. A. Prudnikov, "Development of a Methodology for the General Statement of a Mathematical Design Problem for Finding Structural and Technological Solutions in Systems Design and Technological Preparation of General Mechanical Engineering Production," *Problems of Contemporary Science and Education*. 2012. No. 12 (12), pp. 41-48.
- [16] M. I. Grachev, "Model for Automation of University Management Processes," *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024. ol. 51, No. 4, pp. 60-70. DOI 10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70.
- [17] M. I. Grachev, V. G. Burlov, "System-forming factor of automation of management processes in organizational systems," *Siberian fire and rescue bulletin*. 2025. No. 4 (39), pp. 21-31. DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.13.94.002.
- [18] P. K. Anokhin, "Fundamental issues of the general theory of functional systems," *Selected works*. Moscow: Nauka, 1971. 61 p.
- [19] V. G. Burlov, M. I. Grachev, "Analytical and dynamic model of management decision in socio-economic systems on the example of the head of an educational institution of higher education," *T-Comm*. 2019. Vol. 13, No. 10, pp. 27-34. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10314.
- [20] M. I. Grachev, V. G. Burlov, "The human factor in making management decisions," *T-Comm*. 2024. Vol. 18, No. 3, pp. 27-33. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-3-27-33.

Information about authors:

Mikhail I. Grachev, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Research Fellow, Research Department, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0002-0338-3049

Vyacheslav G. Burlov, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Professor, Higher School of Technosphere Safety, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia

Natalya G. Gracheva, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Lecturer, Russian Language Department, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0003-1563-1393

WIRELESS CHANNEL DESIGN METHOD FOR A TELEPRESENCE SUIT BODY AREA NETWORK BASED ON METASURFACES

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-63-70

Manuscript received 02 April 2026;
Accepted 07 June 2026

Viktoriya Dmitrieva,
 The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of
 Telecommunications (SPbSUT), St. Petersburg, Russia,
dmitrieva.vv0@gmail.com

Andrey E. Koucheryavy,
 The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of
 Telecommunications (SPbSUT), St. Petersburg, Russia,
akouch@mail.ru

Keywords: *metaverse, WBAN, telepresence suit, metamaterials*

A new period of metaverses has generated many challenges. Such relevant research areas as mirror metaverses, digital twin networks, and federations of artificial intelligence agents have become one of the most actively developed both in science and international standardization at the ITU-T, IEEE, and ISO levels. To access completely new resources and capabilities of online universes, in particular mirror metaverses, new methods based on various types of wearable telepresence suits have recently been explored and actively developed. The telepresence suit has many engineering and scientific tasks, as it is primarily the most active representative of ultra-reliable ultra-low latency communication networks (URLLC) with the requirements of the Tactile Internet. In this paper, a model of a telepresence suit based on a cylindrical coordinate system is proposed, and the problem of improving the quality of a wireless communication channel is investigated using the example of a radiating system for wearable networks (WBAN), in particular for a telepresence suit, where the possibility of using a metamaterial as a reflective layer is considered. This design makes it possible to improve the characteristics of the communication channel by improving the directivity of the emitting systems. The geometry and parameters of an SRR cell designed at a frequency of 5 GHz are presented, which is considered as a promising frequency range for the further development of WBAN networks for the first widespread use of telepresence suits.

Information about authors:

Viktoriya V. Dmitrieva, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), St. Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5608-5961>

Andrey E. Koucheryavy, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), St. Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-2479>

Для цитирования:

Дмитриева. В.В., Кучерявый А.Е. Метод организации беспроводных каналов нательной сети костюма телеприсутствия с использованием метаповерхностей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 63-70.

For citation:

V.V. Dmitrieva, A.Y. Koucheryavy, "Wireless Channel Design Method for a Telepresence Suit Body Area Network Based on Metasurfaces," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 7, pp. 63-70.

1 Introduction

The current decade, up to approximately 2030-2035, is shaping the face of the future: the concept of the Internet of Things, having reached the plateau of the Gartner curve, has sought to saturate markets with all kinds of solutions that make it possible to transfer business and public sector digitalization models to the level of data and digital counterparts. The International Telecommunication Union (ITU) has voiced a thesis that the next era of networks and services will be characterized by a multiverse, which is a combination of national, private, and other metaverses. This concept has begun to be implemented, and it is expected that technologies such as digital twin networks, avatars, telepresence suits, digital assets, and digital skills will make it possible to bridge gaps, including those defined in the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). Already at the moment, in addition to the existence of Resolution 105 of the World Telecommunication Standardization Assembly (WTSA 24) itself, there are about thirty draft ITU-T standards in 21 study group, 11 study group, avatars, metaverse structures, problems of compatibility between universes, as well as compatibility of telepresence suits.

At the same time, the problems of deep integration of artificial intelligence technologies into communication networks and services are being investigated. Such tasks cover issues of digital twins and their network, artificial intelligence (AI) agents and their federation, and artificial intelligence sandbox testing environments.

At the same time, research in the field of metaverses, in particular avatars, has identified some of the most interesting and urgent tasks of the modern decade in terms of the development of a new type of user interfaces - telepresence suits. Telepresence suits should have the necessary characteristics of Tactile Internet devices, which was fundamentally developed in the framework of research on various applications of the Internet of Things. The requirements for the tactile Internet are extremely complex and high, with a latency of 1 ms (URLLC and HRLLC) [1-2].

In conditions of imperfect data transmission medium (absence of "laboratory conditions" in the broad sense of the word), a number of natural physical conditions (wave propagation speed, interference, and much more), it is necessary to follow a systematic approach, which consists in considering the problem of delay generation from the sensor of the telepresence suit (signal registration, processing, and transmission over the on-board network), transfers from a telepresence suit to a network coordinator or base station with an appropriate wireless channel organization in a noisy environment (including parasitic radiation, absorption, etc.), primary processing on an edge server and subsequent data transmission to avatar.

A special task in this area is and will be the problem of compatibility of telepresence suits and avatars in network universes, mirror metaverses. Recently, many studies and publications have been devoted to the development of telepresence suits [3-5]. One of the publications provides a method for optimized data transmission and signal processing for telepresence suits, which also provides a comparative analysis of existing telepresence suit designs. Currently, such prototypes and solutions are known as: Tesla Suits, Senso, Perception Neuron 3, OWO Skin Haptic Suit and Kold.

The TeslaSuit telepresence suit uses a set of IMU sensors to capture movements, and also offers advanced features such as

electroneuromyography (with muscle stimulation), making it suitable, for example, for medicine. The Senso telepresence suit integrates internal and external IMU sensors, it is worth noting that it does not have tactile sensors, and is mainly focused on virtual reality (for example, in the tasks of immersion in the virtual worlds of immersive video games). The Perception Neuron 3 telepresence suit also uses IMU sensors. The OWO Skin Haptic Suit, although focused on tactile sensations and immersive services, still has limited technical capabilities. The Kold telepresence suit, developed at the Meganetlab 6G laboratory (SPbGUT), has both a sensory part and an actuating part for kinesthetic feedback, and is suitable for medical applications. It should be clarified that these telepresence suits have been developed and are being researched by research teams from different countries: Great Britain, Spain, Japan, USA, China and Russia. Naturally, the existing functionality in these telepresence suits is represented by the set that was necessary for the tasks of the relevant research. However, it is worth noting that telepresence suits represent a new type of user interface, as previously mentioned, and have a huge set of scientific tasks. These tasks can be more effectively explored taking into account the developed solutions, such as infrastructure, for example, the same Kold telepresence suit. The presented comparison highlights the diversity of existing technological advances in this field of research [3, 6].

Despite the staggering pace of development of network universe technologies, immersive technologies and the tactile Internet, there are still significant problems and scientific tasks that need to be solved for a full-fledged user interaction with virtual avatars. One of the most pressing problems is the transmission of a large amount of data (direct and reverse kinesthetic communication with the avatar based on dozens of sensors and actuators, heat and cold data transmission for subsequent regeneration, etc.) via wireless communication channels between the telepresence suit and the network coordinator, in conditions of jamming, parasitic radiation. These limitations lead to delays, inaccuracies, and reduced immersion, which is critical for applications that require precise control (positioning an avatar in a mirrored metaverse based on telepresence suit sensors), including virtual simulations, control of remote physical avatars (for example, robots based on data from a user's virtual avatar), and avatar-based interaction (avatar-avatar interaction).

2 A model of a telepresence suit

Immersive technologies allow you to partially or completely immerse yourself in the digital environment, depending on the requirements and services provided to the user. Let's consider the scenario of user interaction with an avatar in the digital universe – this is possible thanks to user devices such as a telepresence suit [7]. When a human moves, the suit changes shape, forming creases or bends. For the purpose of comfortable interaction, it is necessary to take into account the features of user movement, in addition, when designing such devices, it is necessary to take into account the influence of the body on the propagation of the radio signal.

Due to the development of immersive technologies, the design of wearable devices remains an urgent task, including the creation of new concepts of radiating devices for WBAN networks. When designing such systems, it is necessary to take into account the large number of sensors placed in the suit, from which a number

of technical tasks can be identified to preserve gain, reduce parasitic radio radiation, and suppress inter-channel communication between neighboring WBAN elements. In addition, it is important to take into account the features of the human body shape – for this it is necessary to introduce an approximating surface.

Consider the position of the sensors in the telepresence suit in the cylindrical coordinate system. Then the sensor or radiating device will have 3 coordinates $A(r, \varphi, z)$, and the r coordinate is always unchanged when moving, since the location of the device in the suit relative to the central selected axis is unchanged (FIG.1). Then we assume a change in coordinates when moving:

$$\begin{cases} r = \text{const}, \\ \varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi, \\ z = z_0 + \Delta z. \end{cases}$$

By representing the body segments as a cylindrical coordinate system [8] and determining in advance the permissible ranges of radii of curvature and orientations of the emitting systems, it is possible to systematize the requirements for the placement of radiators on a telepresence suit with minimal losses.

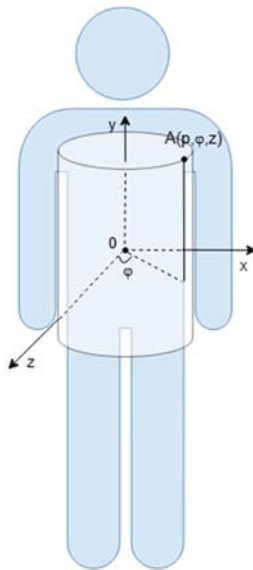


Fig. 1. Cylindrical coordinate system

To date, there are works devoted to the design of radiating systems for wearable devices. Broadband radiators can be used for WBAN systems [9]. It was noted in the work that the geometry of the body and the location of the antenna have a significant impact on the characteristics. In [10, 11], the antennas for the frequency bands of the WBAN networks are presented: 2.4GHz and 5.8 GHz, the study is carried out mainly on a planar or slightly curved substrate.

In the considered works, special attention is paid to miniaturization and improvement of the emitter matching parameters, while the influence of the user's body shape and surface curvature on the electromagnetic characteristics of antennas is considered to be limited. Most of the works [12, 13] do not take into account the peculiarities of changing the shape of emitting systems and do not consider the possibility of improving the directional characteristics and reducing back radiation.

One of the promising directions for improving the guiding properties of the emitter of wearable systems is the use of a meta-surface as a reflective surface. In [14-16], a meta-surface is used

for WBAN radiators as an improvement in the directivity index, but they do not take into account the peculiarities of the human body structure. Thus, despite the large number of works devoted to WBAN networks, the development and improvement of a compact radiator, taking into account the requirements, remains an urgent task.

In this paper, a meta-surface for a telepresence suit based on an SRR cell is proposed and investigated, implemented on a locally cylindrical substrate with radii of curvature corresponding to body segments of the user of the telepresence suit.

3 Problem statement. Antenna characteristics for WBAN systems

The antennas in WBAN networks are located directly near the human body. When researching devices for wireless wearable networks, it is necessary to take into account the electromagnetic properties of the devices that affect the user, as well as the user's influence on changes in the signal-to-noise environment. For example, an antenna integrated into a telepresence suit undergoes constant physical changes when the user moves. One of the key characteristics of antennas is the directional pattern. And when the same radiator is placed on planar and cylindrical surfaces, its radiation pattern usually differs, since the geometry of the surface changes (Fig. 2), which results in a change in the distribution of induced currents and phase ratios between elementary radiation sources at the aperture. In view of all the above, for the far zone, this is reflected in the change in the angular function of the radiation pattern.

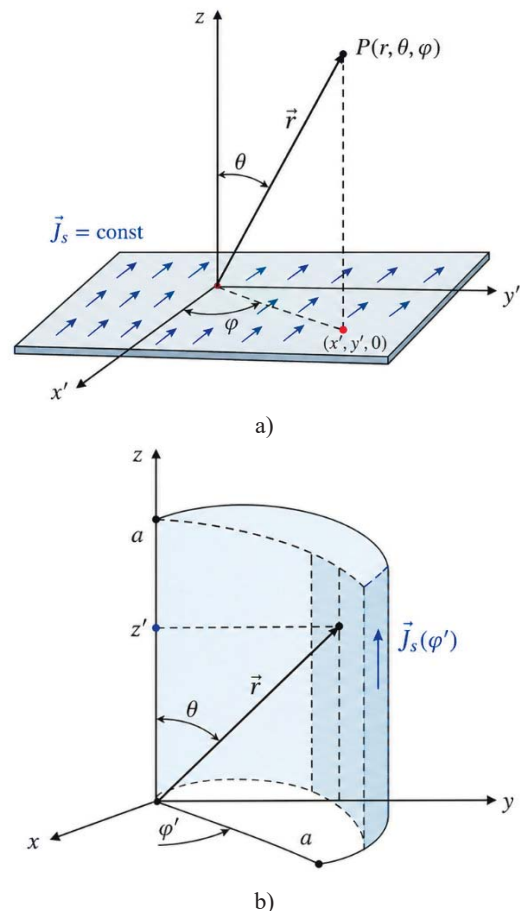


Fig. 2. Radiating surfaces a) planar b) cylindrical

For an arbitrary distribution of surface currents $\vec{J}_s(\vec{r}')$, the electromagnetic field strength in the far zone can be written as [11-12]

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) \cong j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \int_S \vec{J}_s(\vec{r}') e^{jkr \cdot \vec{r}'} dS$$

From where it is obvious that the difference between planar and cylindrical surfaces is determined by the area, the law of current distribution on the surface and the phase multiplier.

For a planar surface $z=0$, the surface point has coordinates $(x', y', 0)$, and the multiplier takes the form:

$$r \cdot \vec{r}' = x' \sin\theta \cos\varphi + y' \sin\theta \sin\varphi$$

For a cylindrical surface of radius a , the surface point is given as $(a \cos\phi', a \sin\phi', z')$ and the multiplier is converted to the form:

$$r \cdot \vec{r}' = a \sin\theta \cos(\varphi - \phi') + z' \cos\theta$$

The appearance of the $\cos(\varphi - \phi')$ function and a change in the current distribution over the curved surface leads to a change in the radiation pattern compared to the planar case.

Let us form the task of synthesizing the structure for the WBAN radiator in a cylindrical coordinate system (r, ϕ, z) in order to take into account the geometry of the human body. The antenna and its elements are considered as distributed over the surface of a cylinder approximating a body segment.

In addition, an important goal in the development of wearable devices is to minimize the specific absorption of electromagnetic fields (SAR) by human body tissues. According to American standards, the SAR level should not exceed 1.6 W/kg for every gram of fabric, and according to European standards, it should not exceed 2 W/kg for 10 grams of fabric. [11]

The specific absorption coefficient (SAR) in tissues is calculated [12]:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

Where σ is the specific conductivity; E is the electric field strength and ρ is the specific density of the substance.

In wearable systems, the emitter should be compact, low-profile, and lightweight. One of the key parameters of the radiator for a telepresence suit is to take into account changes in position and orientation in space, as well as minimizing back radiation.

4 Analysis of the mathematical material structure for telepresence suits

Metamaterials include artificially created materials with a periodic structure. The properties of such cells are determined by geometric dimensions - the dimensions of the resonators and the inter-element distances are significantly less than the operating wavelength. One of the promising directions for the development of metamaterials is the use of a structure of miniature split ring frames acting as magnetic dipoles. Some types of metamaterials are presented in [20,21], for example: Edge-coupled SRR (Fig.3a), Omega SRR (Fig. 3b) and S ring (Fig. 3c). Moreover, on the last two, a cell of a repeating shape is supplemented on the reverse side of the substrate.

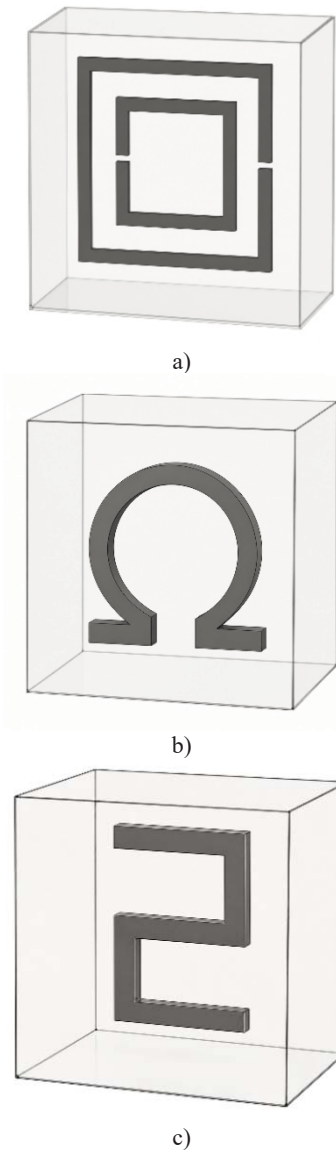


Fig. 3. a) Edge-coupled SRR b) Omega SRR c) S ring

It is known that the behavior of an electromagnetic wave is determined, among other things, by the properties of materials. Figure 4 shows the classification of materials based on the properties of their electrical and magnetic permeability. Most materials have positive characteristics $\epsilon > 0, \mu > 0$ (DPS) – these are ordinary dielectrics such as FR-4, duroid. In such media, the wave propagates according to the classical theory of wave reflection and refraction, and the refractive index and wave resistance are determined by the expressions:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, Z = Z_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}}$$

Where $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, $\mu_r = \mu/\mu_0$, Z_0 – wave resistance of free space

The material environment $\epsilon < 0, \mu > 0$ (ENG) such indicators are observed in plasma in the frequency range when $\omega < \omega_p$, [19]:

$$\epsilon_p = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2$$

Also, some precious metals (silver, gold) may have a negative dielectric constant in the infrared and visible regions of the spectrum.

If $\epsilon > 0$, $\mu < 0$ (MNG), some gyrotropic materials (ferrites) may have such properties in a narrow frequency range.

The material environment with properties of both negative dielectric and magnetic permeability (DNG) do not exist in nature, but they can be artificially created, such media are called metamaterials. To achieve such properties, it is necessary to create a special, periodic cell structure, the dimensions of which are smaller than the wavelength. For such media, the refractive index can be negative and equal to [20, 21]:

$$n = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

$$n \approx -|\epsilon_r|^{1/2} |\mu_r|^{1/2} \left[1 + \frac{j}{2} \left(\frac{\epsilon''}{|\epsilon_r| \epsilon_0} + \frac{\mu''}{|\mu_r| \mu_0} \right) \right]$$

Thus, the creation of a metamaterial with the required electrodynamic properties is reduced to the synthesis of a unit cell providing the necessary electrical and magnetic characteristics.

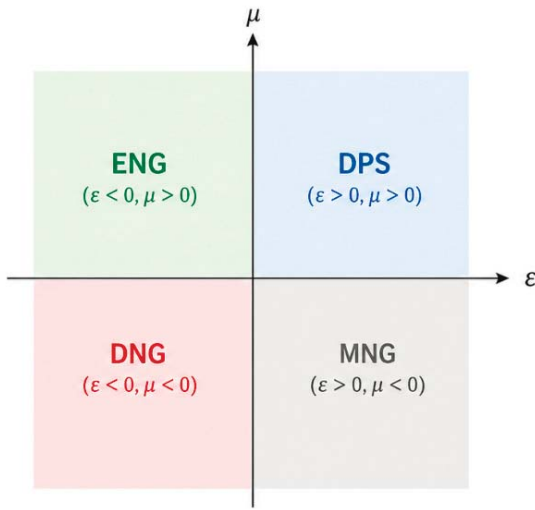


Fig. 4 Classification of materials depending on the sign of magnetic and dielectric permittivity

Since it is necessary to minimize back radiation for the purpose of this task, the material must have high-impedance properties. One of the possible embodiments of such a cell may be an SRR cell, such a structure creates a resonant magnetic reaction, which is why the material can exhibit electromagnetic properties such as negative magnetic permeability near the resonant frequency. Thus, Edge-coupled SRR is well suited for minimizing back radiation, and it can be used to obtain the magnetic and impedance characteristics necessary for the shielding properties of the system, while the cell has compact dimensions [20].

Provided that the period of the structure and the thickness of the substrate are significantly less than the radius of the substrate (in the form of a cylinder). Then such a cell can be described by a planar LC model of the first approximation. We will write the condition as:

$$p \ll R, d \ll R$$

An equivalent metasurface can be described by an LC circuit with an impedance equal to [22]:

$$Z_s(\omega) = j \frac{\omega L_{eq}}{1 - \omega^2 L_{eq} C_{eq}}$$

The surface is inductive at low frequencies and capacitive at high frequencies. The impedance is very high near the resonant frequency:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_{eq}}}$$

To create a cell structure with the characteristics of an artificial magnetic conductor (AMC), the equivalent surface resistance must be significantly greater than the wave resistance of the free space at frequency f_0 . In this mode, at the transition boundary, the tangential component of the magnetic field approaches 0 (practically suppressed). As a result, the currents on the surface are in phase with the currents in the emitting element, which makes it possible to increase the directivity of the radiator and reduce the power in the direction of the user's body.

The reflection coefficient at normal incidence is related to the surface impedance by the ratio

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}, \quad \phi = \arg(\Gamma)$$

Where $Z_0 \approx 377 \text{ Ohm}$, for AMC, the reflection phase should tend to 0 degrees.

5 Modeling and analysis of a metamaterial cell for a telepresence suit

Based on the structure of the SRR type metasurface, a single cell was created (Fig. 5) with substrate dimensions (9.5x9.5x1.6) mm, providing a resonant magnetic response and a high surface impedance in the 5 GHz range. Additionally, the small geometric dimensions of the SRR cell relative to the wavelength ensure a low profile of the shielding layer, which makes the selected meta-surface convenient for integration into cylindrical segments of WBAN devices.

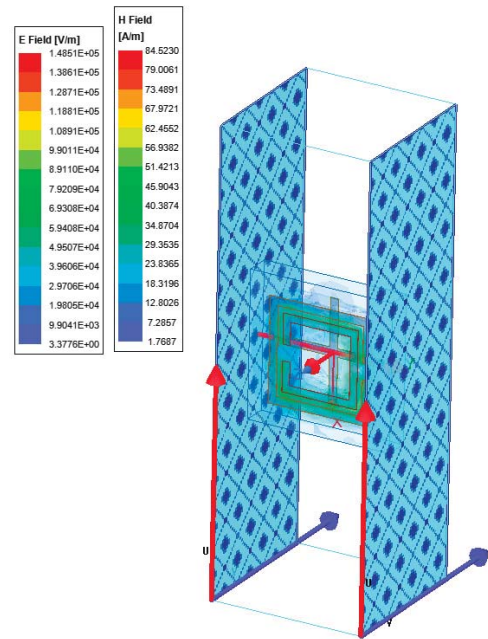


Fig. 5. Setting of boundary conditions

Based on the formed cell of the first approximation, parametric optimization was performed and a set of cell sizes corresponding to a resonant frequency of 5 GHz was selected. Figure 6 shows the S-parameters for the dimensions of the sides of the cell rings: for the outer ring it is 6.8 mm and for the inner 5mm with a cutout of 1.05 mm.

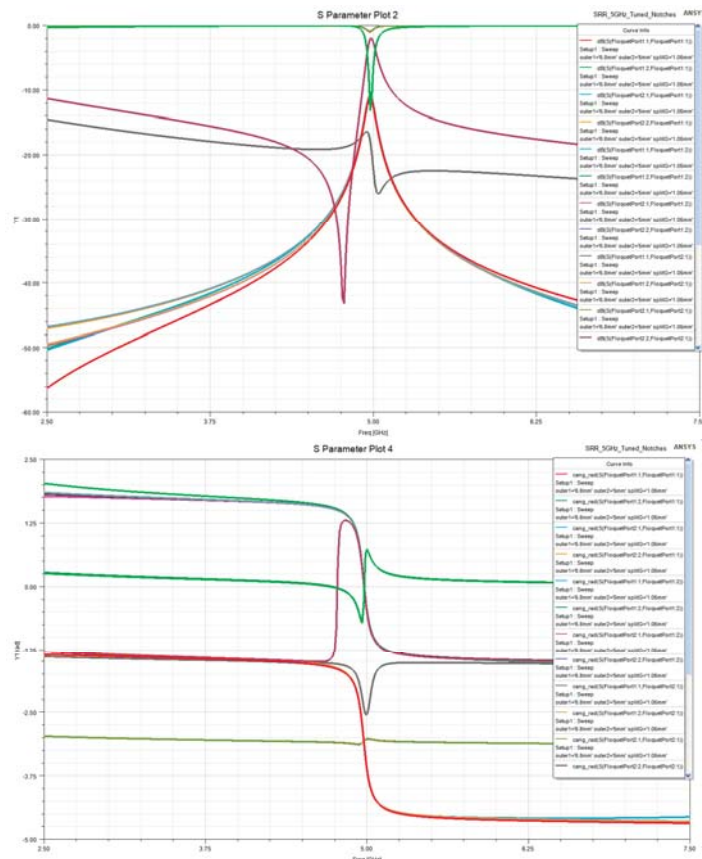


Fig. 6. S-parameters

Figure 7a shows the frequency dependences of the real $\epsilon'(f)$ and imaginary $\epsilon''(f)$ parts of the effective permittivity of the simulated metasurface. The real part (green) shows a sharp dispersion transition near the resonance: as the frequency increases, it changes monotonously and quickly passes through zero in a narrow frequency range, which indicates the formation of a region with negative effective permeability. The imaginary part (red) has a pronounced narrow maximum at the resonant frequency, reflecting an increase in losses.

Figure 7b shows the frequency dependences of the real $\mu'(f)$ and imaginary $\mu''(f)$ parts of the effective magnetic permeability. The real part (green) shows a resonant dispersion: when moving away from the resonance, its value remains close to unity, whereas in a narrow region around the resonant frequency, a sharp transition is observed and a frequency range with a negative effective magnetic permeability $\mu' < 0$ is formed. This behavior corresponds to the occurrence of a strong magnetic response due to circulating currents in the SRR structure and is a sign of a metamaterial. The imaginary part (red) has a pronounced narrow maximum in the vicinity of the resonant frequency.

Figure 7c shows the frequency dependence of the complex wave resistance of the metasurface obtained on the basis of the extracted effective parameters.

The simulation results demonstrate the possibility of creating a structure with negative parameters of dielectric and magnetic permeability in a narrow range of operating frequencies.

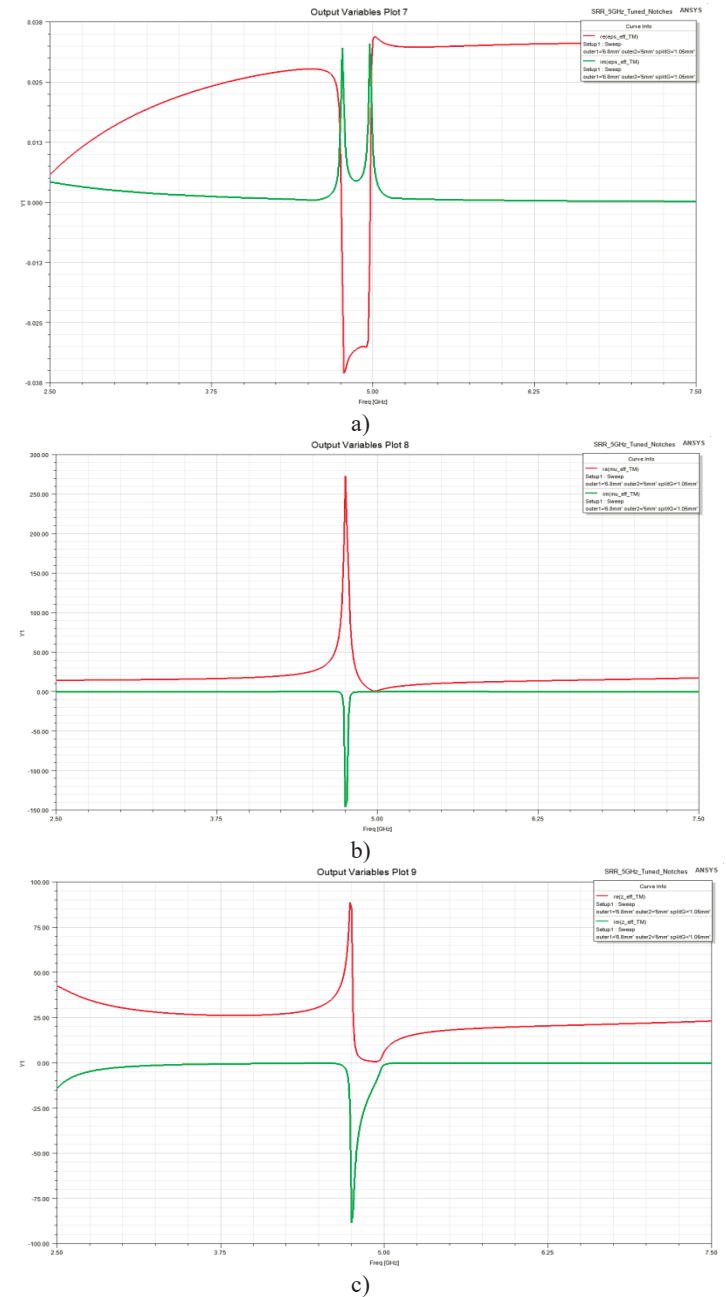


Fig. 7. Characteristics of a) dielectric constant b) magnetic permeability c) wave resistance

6 Application of a metasurface in a telepresence suit to improve the signal-to-noise ratio

One of the tasks in developing a telepresence suit wearable network is to reduce unwanted parasitic radiation that occurs due to the large number of radiating elements on the surface of the suit. By parasitic radiation we mean additional electromagnetic fields that arise.

Spurious radiation introduces additional losses into the communication channel, which reduces the signal-to-noise ratio.

Then the expression of the signal to noise ratio is:

$$SNR = \frac{P_c}{P_{\text{III}}} = \frac{P_c}{P_{\text{TIII}} + P_{\text{IIIIM}}}$$

Where P_c – the signal power, P_{TIII} – is the power converted into heat due to conductor loss and dielectric loss in the line or component, P_{IIIIM} – is the insertion loss component due to parasitic radiation, i.e., power that leaves the transmission structure as electromagnetic radiation instead of reaching the load

Various metasurfaces provide phase and amplitude control of the wavefront, which makes it possible to form directional patterns and reduce the scattering field in specified angular regions. As a result, the power of the parasitic radiation is reduced compared to the configuration of the telepresence suit without a meta-surface. This effect has been confirmed by experimental and numerical results, for example, by reducing the level of the side lobes [23] and increasing the directivity [21, 24] in the antennas of sensors with metasurfaces. As a result, the total signal-to-noise ratio in the channel increases.

Conclusions

For wearable devices of WBAN networks and telepresence suits, the use of metamaterials has a promising direction, since they have properties that affect the propagation characteristics of electromagnetic energy. The development and improvement of such systems will increase the overall signal-to-noise ratio for WBAN networks, in particular for ultra-dense networks of telepresence suits. The article presented an element of a miniature cell design at an operating frequency of 5 GHz. Modeling showed that the developed element made it possible to preserve the characteristics with varying curvature of the substrate with a radius of up to 30 mm.

Due to the optimal choice of filling cells in each node of the meta-surface, it is possible to suppress radiation in the direction of the body, reduce the level of the side and rear lobes, and simultaneously enhance radiation in the desired radiation direction. Thus, the meta-surface can serve as a thin "secondary radiator", which is a real need in the curved surfaces of telepresence suits.

The disadvantages of such a surface include a narrow range of operating frequencies, since the mode of an artificial magnetic conductor is formed near resonance and usually persists only in a limited band where the characteristics remain close to the required values. At the same time, the created meta-surface of their group of unit cells has unique properties (controlled phase response, suppression of surface waves, formation of a given radiation pattern), which in turn opens up opportunities for targeted optimization of the communication channel and the creation of compact wearable emitting systems with specified parameters.

References

- [1] ITU-R, *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*, Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015.
- [2] A. E. Kucheryavy, A. A. Dawood, A. N. Volkov, et al., *Sixth-Generation Communication Networks: Fractal Architectures, Holographic Interactions, Telepresence, and Networked Robots*. St. Petersburg, Russia: Piter, 2024, 318 p.
- [3] A. Volkov, A. Muthanna, A. Paramonov, A. Koucheryavy, and I. A. Elgendy, "Optimized Data Transmission and Signal Processing for Telepresence Suits in Multiverse Interactions," *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 13, no. 6, p. 82, 2024, doi: 10.3390/jsan13060082.
- [4] V. Dmitrieva, A. Volkov, O. Agranovich, et al., "Towards Seamless Integration: Adaptive EMG Signal Processing for Avatar Control in Metaverse," in *Proc. 9th Int. Conf. Future Netw. Distrib. Syst.*, 2025, pp. 1093–1101.
- [5] A. A. Ateya, et al., *Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks*. Aalborg, Denmark: River Publishers, 2025.
- [6] A. N. Volkov, "Metaverses as the next stage in the development of network technologies," in *Proc. Sci.-Tech. Conf. of the St. Petersburg A. S. Popov Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications, Dedicated to Radio Day*, no. 1(79), p. 210, 2024.
- [7] V. V. Dmitrieva, A. N. Volkov, and O. E. Agranovich, "Novyi metod vzaimodeistviya s avatarom v multivselennoi na osnove metoda adaptivnoi obrabotki EMG-signalov," *Elektrosvyaz*, no. 3, pp. 10–19, 2026, doi: 10.34832/ELSV.2026.77.3.002.
- [8] L. Xiong, H. Miao, and Z. Yao, "Human Body Model for Channel Characterization Based on Ray-Tracing," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2020, Art. no. 5817508, 2020.
- [9] S. N. Mahmood, et al., "ON-OFF Body Ultra-Wideband (UWB) Antenna for Wireless Body Area Networks (WBAN): A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 150844–150863, 2020.
- [10] U. Musa, et al., "Design and Analysis of a Compact Dual-Band Wearable Antenna for WBAN Applications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 30996–31009, 2023.
- [11] T. T. Le and T. Y. Yun, "Miniaturization of a Dual-Band Wearable Antenna for WBAN Applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 1452–1456, 2020.
- [12] P. Sambandam, et al., "Miniaturized Button-Like WBAN Antenna for Off-Body Communication," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 7, pp. 5228–5235, 2020.
- [13] M. Kanagasabai, et al., "On the Design of Frequency Reconfigurable Tri-Band Miniaturized Antenna for WBAN Applications," *AEU–Int. J. Electron. Commun.*, vol. 127, Art. no. 153450, 2020.
- [14] A. R. H. Alhawari, et al., "Metamaterial-Based Wearable Flexible Elliptical UWB Antenna for WBAN and Breast Imaging Applications," *AIP Adv.*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [15] T. Saedi, et al., "Sub-6G Metamaterial-Based Flexible Wearable UWB Antenna for IoT and WBAN," in *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Dependable, Autonomic and Secure Computing, Int. Conf. Pervasive Intell. Comput., Int. Conf. Cloud and Big Data Comput., Int. Conf. Cyber Sci. Technol. Congr. (DASC/PiCom/CBDCOM/CyberSciTech)*, 2020, pp. 7–13.
- [16] S. Douhi, et al., "Metamaterial-Integrated Wearable UWB Antenna with SAR Reduction and Gain Enhancement for Wireless Body Area Sensor Networks (WBASNs): Design and Experimental Verification," *Sens. Actuators A: Phys.*, vol. 388, Art. no. 116499, 2025.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [18] L. D. Goldstein, *Electromagnetic Fields and Waves*. Moscow, USSR: Ripol Klassik, 1956.
- [19] S. K. Zhdanov, et al., *Fundamentals of Physical Processes in Plasma and Plasma Devices*. Moscow, Russia: MEPhI, 2007.
- [20] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, Eds., *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [21] V. Slyusar, "Metamaterials in Antenna Engineering: Basic Principles and Results," *Pervaya Milya*, vol. 18, no. 3–4, pp. 44–60, 2010.
- [22] D. Sievenpiper, et al., "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059–2074, 1999.
- [23] M. Q. Qi, et al., "Suppressing Side-Lobe Radiations of Horn Antenna by Loading Metamaterial Lens," *Sci. Rep.*, vol. 5, Art. no. 9113, 2015.
- [24] H. Attia, et al., "Metamaterial for Gain Enhancement of Printed Antennas: Theory, Measurements and Optimization," in *Proc. 2011 Saudi Int. Electron., Commun. Photon. Conf. (SIECPC)*, 2011, pp. 1–6.

МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ НАТЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Дмитриева Виктория Викторовна, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), Санкт-Петербург, Россия, dmtrieva.vv0@gmail.com

Кучерявый Андрей Евгеньевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), Санкт-Петербург, Россия, akouch@mail.ru

Аннотация

Эра сетевых вселенных (метавселенных) сформировала множество вызовов. Такие актуальные направления исследований, как: зеркальные метавселенные, сети цифровых двойников и федерации агентов искусственного интеллекта стали одними из активно развиваемых как в науке, так и международной стандартизации на уровне ITU-T, IEEE, ISO. Для доступа к совершенно новым ресурсам и возможностям сетевых вселенных, в частности зеркальных метавселенных, в последнее время исследуется и активно разрабатываются новые методы на основе носимых костюмов телеприсутствия различного вида. Костюм телеприсутствия обладает множеством инженерных и научных задач, так как в первую очередь он является самым активным представителем сетей URLLC - сверхнадежных сетей связи с ультрамалой задержкой с требованиями Тактильного интернета. В данной работе предложена модель костюма телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат, а также исследована проблема повышения качества беспроводного канала связи на примере излучающей системы для нательных сетей (WBAN), в частности для костюма телеприсутствия, где в качестве отражающего слоя рассмотрена возможность применения метаматериала. Такое исполнение позволяет улучшить характеристики канала связи за счет улучшения направленности излучающих систем. Приведена геометрия и параметры SRR-ячейки, рассчитанной на частоте 5 ГГц, которая рассматривается как перспективный частотный диапазон для дальнейшего развития систем WBAN для первого широкого распространения костюмов телеприсутствия.

Ключевые слова: метавселенная, WBAN, костюм телеприсутствия, метаматериалы.

Литература

1. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Geneva: ITU, 2015.
2. Кучерявый А. Е., Давуд А. А. А., Волков А. Н. и др. Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы: учебник. Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2024. - 318, [1] с. (Учебник для вузов). ISBN 978-5-4461-4289-7.
3. Volkov A. et al. Optimized data transmission and signal processing for telepresence suits in multiverse interactions // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2024. Т. 13. № 6. С. 82.
4. Dmitrieva V. et al. Towards Seamless Integration: Adaptive EMG Signal Processing for Avatar Control in Metaverse // Proceedings of the 9th International Conference on Future Networks and Distributed Systems. 2025. С. 1093-1101.
5. Ateya A. A. et al. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. River Publishers, 2025.
6. Волков А. Н. Метавселенные как следующий виток развития сетевых технологий // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио: сборник материалов конференции. 2024. № 1(79). С. 210.
7. Дмитриева В. В., Волков А. Н., Агранович О. Е. Новый метод взаимодействия с аватаром в мультивселенной на основе метода адаптивной обработки ЭМГ-сигналов // Электросвязь. 2026. № 3. С. 10-19. DOI 10.34832/ELSV.2026.77.3.002.
8. Xiong L, Miao H., Yao Z. Human Body Model for Channel Characterization Based on Ray-Tracing // International Journal of Antennas and Propagation. 2020. Т. 2020. № 1. С. 5817508.
9. Mahmood S. N. et al. ON-OFF body ultra-wideband (UWB) antenna for wireless body area networks (WBAN): a review // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 150844-150863.
10. Musa U. et al. Design and analysis of a compact dual-band wearable antenna for WBAN applications // IEEE Access. 2023. Т. 11. С. 30996-31009.
11. Le T. T., Yun T. Y. Miniaturization of a dual-band wearable antenna for WBAN applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Т. 19. № 8. С. 1452-1456.
12. Sambandam P. et al. Miniaturized button-like WBAN antenna for off-body communication // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Т. 68. № 7. С. 5228-5235.
13. Kanagasabai M. et al. On the design of frequency reconfigurable tri-band miniaturized antenna for WBAN applications // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2020. Т. 127. С. 153450.
14. Alhawari A. R. H. et al. Metamaterial-based wearable flexible elliptical UWB antenna for WBAN and breast imaging applications // AIP Advances. 2021. Т. 11. № 1.
15. Saeidi T. et al. Sub-6G metamaterial-based flexible wearable UWB antenna for IoT and WBAN // 2020 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech). IEEE, 2020. С. 7-13.
16. Douhi S. et al. Metamaterial-integrated wearable UWB antenna with SAR reduction and gain enhancement for Wireless Body Area Sensor Networks (WBASNs): Design and experimental verification // Sensors and Actuators A: Physical. 2025. Т. 388. С. 116499.
17. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & sons, 2016.
18. Гольдштейн Л. Д. Электромагнитные поля и волны. Рипол Классик, 1956.
19. Жданов С. К. и др. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках // ВА Курнаева. М.: МИФИ. 2007.
20. Engheta N., Ziolkowski R. W. (ed.). Metamaterials: physics and engineering explorations. John Wiley & Sons, 2006.
21. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая мяля. 2010. Т. 18. № 3-4. С. 44-60.
22. Sievenpiper D. et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques. 1999. Т. 47. № 11. С. 2059-2074.
23. Qi M. Q. et al. Suppressing side-lobe radiations of horn antenna by loading metamaterial lens // Scientific reports. 2015. Т. 5. № 1. С. 9113.
24. Attia H. et al. Metamaterial for gain enhancement of printed antennas: Theory, measurements and optimization // 2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPC). IEEE, 2011. С. 1-6.

Информация об авторах:

Дмитриева Виктория Викторовна, старший преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), Санкт-Петербург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5608-5961>

Кучерявый Андрей Евгеньевич, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных, д.т.н., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-2479>

MULTIMODAL METHODOLOGY FOR INTEGRATED DRIVING STYLE ASSESSMENT OF CONSTRUCTION MACHINERY OPERATORS BASED ON COORDINATED USE OF CAN DATA AND TELEMATICS

Petr I. Smirnov,

*Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport
Vologda State University, Vologda, Russia, smirnovpi@vogu35.ru*

Oleg A. Valyaev,

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
(MADI), Moscow, Russia, o.valyaev@madi.ru*

Natalia I. Baurova,

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
(MADI), Moscow, Russia, nbaurova@mail.ru*

Grigory S. Mazlumyan,

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
(MADI), Moscow, Russia, g.mazlumyan@madi.ru*

Boris S. Subbotin,

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
(MADI), Moscow, Russia, bsubbotin@mail.ru*

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-71-79

Manuscript received 08 April 2026;

Accepted 12 June 2026

Keywords: driving style, CAN bus, telematics, driver scoring, multimodal analysis, trip identifier, construction machinery, fuel efficiency

The operation of construction machinery is associated with high fuel costs and intensive wear of components, which are largely determined by the operator's driving style. This paper proposes a multimodal methodology for integrated driving style assessment based on the coordinated use of low level CAN data (signal plane) and aggregated fuel consumption indicators (user plane) using an end to end trip identifier. Unlike existing approaches focused on classifying driving style by individual parameters, the proposed methodology allows the formation of an integrated Driving Aggressiveness Index (DAI) correlated with fuel efficiency. Validation was performed on the open Vehicle Energy Dataset (VED) containing second by second CAN records of 299 vehicles (26,286 trips). It is shown that DAI has a significant positive correlation with mean mass air flow (MAF) used as a proxy for fuel consumption: at the trip level $\rho = 0.280$ ($p < 0.0001$), at the driver level $\rho = 0.292$ ($p < 0.0001$). The scientific novelty consists in transferring the methodology of coordinated analysis of two planes (similar to TEID in LTE networks) to the driver scoring task, as well as in adapting the approach for construction machinery. The practical significance lies in creating a basis for fleet monitoring systems that can reduce fuel consumption and operating costs through objective driving style assessment.

Information about authors:

Petr I. Smirnov, Vologda State University, Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Department of Automobiles and Automotive Industry, Associate Professor, PhD, Vologda, Russia. orcid.org/0000-0002-9405-7248

Oleg A. Valyaev, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Institute of Automotive and Special Equipment and Engineering, Department of Transport Installations, Senior Lecturer, Moscow, Russia. o.valyaev@madi.ru, ORCID 0009-0000-1025-8388

Natalia I. Baurova, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Institute of Automotive and Special Equipment and Engineering, Department of Production and Repair of Automobiles and Road Construction Machinery, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow, Russia. nbaurova@mail.ru, ORCID 0000-0001-9529-2031

Grigory S. Mazlumyan, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Vice-Rector for Research, Candidate of Technical Sciences, Moscow, Russia. g.mazlumyan@madi.ru, ORCID 0009-0001-9296-0775

Boris S. Subbotin, Ph.D. (Engineering), Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Senior Researcher, Ph.D. (Engineering), A.N. Kosygin Russian State University, Associate Professor, Moscow, Russia, ORCID 0000-0003-1685-082X

Для цитирования:

Смирнов П.И., Вальяев О.А., Баурова Н.И., Мазлумян Г.С., Субботин Б.С. Мультимодальная методика интегральной оценки стиля вождения операторов дорожно-строительной техники на основе согласованного применения CAN-данных и телематики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 71-79.

For citation:

P. I. Smirnov, O. A. Valyaev, N. I. Baurova, G. S. Mazlumyan, B. S. Subbotin, "Multimodal methodology for integrated driving style assessment of construction machinery operators based on coordinated use of CAN data and telematics," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 7, pp. 71-79.

1 Introduction

Modern road construction companies incur significant operating costs associated with fuel consumption, transmission and chassis wear, and unscheduled repairs. According to industry research, up to 30% of excess fuel consumption in fleets is due not to the technical condition of the vehicles, but to the individual driving style of operators [1]. Aggressive acceleration, harsh braking, suboptimal gear selection, and prolonged operation at elevated engine speeds not only increase fuel consumption but also reduce the lifespan of components, especially in off-road conditions and under the heavy-duty operating conditions typical of construction and quarry equipment.

At the same time, fleet monitoring systems based on standard telematics devices provide, as a rule, generalized information about mileage, engine operating time and fuel consumption, but do not allow detailed analysis of operator behavior in real time. To objectively assess driving style, it is necessary to integrate data from the CAN bus (Controller Area Network), reflecting instantaneous parameters of the engine and controls, and telematics fuel efficiency indicators. However, existing approaches to driver behavior analysis typically either use only CAN/OBD data for style classification or are limited to fuel consumption statistics without deep correlation with driving events.

In the field of telecommunications, a method for the coordinated use of signaling and user data via an end-to-end identifier (TEID) [2] was proposed to address the problem of identifying mass streaming video in LTE networks. This methodology, based on the correlation of the control plane (session parameters, QoS) and the user plane (IP addresses, SN, packet sizes), allows for increased accuracy of traffic analysis without decoding the content. Transferring this approach to the transportation problem of assessing driving style opens up new possibilities: CAN events (sharp accelerations, gas pedal positions, engine speed) act as the "signaling plane," while data on instantaneous and average fuel consumption act as the "user plane." A unique trip identifier serves as the end-to-end identifier linking both planes.

The aim of this work is to develop a multimodal methodology for the integrated assessment of the driving style of road construction equipment operators, based on the coordinated use of CAN data and telematic fuel consumption indicators using an end-to-end trip identifier.

To achieve this goal, the following tasks have been set:

1. To analyze the current state of research in the field of driving style classification and scoring systems based on CAN/OBD data.
2. Propose a formalization of two data planes (signal and user) similar to the TEID telecommunications methodology.
3. Develop an integrated Driver Aggressiveness Index (DAI) that combines CAN parameters and fuel consumption data.
4. Test the methodology on the open Vehicle Energy Dataset (VED).
5. Assess the correlation of DAI with fuel efficiency (MAF as a proxy) at the trip and driver levels.

The scientific novelty of the work lies in:

1. Transferring the methodology for the coordinated analysis of two planes (control and user) from the field of telecommunications to the task of scoring vehicle drivers.
2. Developing a formalized approach to the integrated assessment of driving style based on an end-to-end trip identifier combining CAN events and fuel consumption telematics.

3. Adapting the methodology for road construction equipment and verifying it on the large open VED dataset.

The practical significance lies in creating the basis for intelligent fleet monitoring systems that enable real-time classification of operator driving styles and the reduction of fuel consumption and operating costs through objective feedback.

2 Literature review

An analysis of the current state of research in driver behavior analysis, driving style classification, and scoring systems reveals the emergence of several established research trends. This review examines studies on general methodologies, classification and scoring methods based on CAN/OBD data, the use of telematics for fuel efficiency assessment, and safety and behavior prediction systems.

2.1 Review papers on driver behavior and machine learning methods

A systematic analysis of approaches to studying driver behavior is presented in the works of Kiyamov and Moseva [3], which examine machine learning methods for driver classification, data sources (including MEMS sensors), and the types of problems to be solved. The authors emphasize that the choice of classification method directly depends on the available data and interpretability requirements.

Of considerable interest is the review by Michailidis et al. [4], which focuses on machine learning-based OBD-II applications for improving the resilience, efficiency, safety, and security of automotive systems. The paper systematizes the tasks of fuel optimization, emissions control, driver behavior analysis, anomaly detection, and cybersecurity.

A specialized review of driver behavior scoring was conducted by Shirole et al. [5]. The authors analyze a two-stage approach: first, aggressive events are classified using ML/DL models, then an overall driver score is formed. The review emphasizes the relevance of developing interpretable and computationally efficient scoring systems for commercial vehicles.

In the work of Mobini Seraji et al. [6] presents a review of clustering and classification methods for driver behavior analysis. Algorithms ranging from k-means and SVM to hybrid deep learning models are discussed in detail, and the role of data preprocessing and feature extraction is demonstrated.

2.2 Methods of driving style classification and behavior scoring

A significant portion of research is devoted to the development of models for recognizing driving style (aggressive, normal, cautious) using various algorithms.

Wang et al. [7] proposed a fuzzy logic-based driving style classification method for a lane departure warning system, identifying four categories: aggressive, relatively aggressive, relatively cautious, and cautious. The classification parameters included the distance to the vehicle in front, the frequency of speeding, and the steering wheel angle.

Szumska and Stańczyk [8] conducted a preliminary classification of the driving style of 69 city bus drivers based on the average maximum values of longitudinal and lateral accelerations obtained from inertial sensors. Age and experience were shown to correlate weakly with accelerations, confirming the universality of the approach.

Zhao et al. [9] developed a method for recognizing the starting

style of electric buses based on deep learning and CAN data, achieving 98.3% accuracy for three classes (cautious, normal, and aggressive). They used a convolutional neural network that automatically extracts spatiotemporal features from multichannel time series.

Nie et al. [10] proposed the MSCA-Net network for commercial vehicles, which combines multi-scale convolution and a channel attention mechanism to account for both short-term maneuvers and long-term behavioral trends. Experiments on real CAN data confirmed the effectiveness of the approach.

Sun et al. [11] presented a comprehensive driving safety assessment method that includes clustering to identify three driving styles (conservative, aggressive, impatient), a BP neural network for prediction, and a weighted scoring function based on a combination of subjective and objective weights.

Kumar and Jain [12] used SVM, AdaBoost, and Random Forest to classify driver behavior into ten categories based on OBD data (speed, RPM, throttle position, engine load). Random Forest performed best with 100% accuracy on the test set.

Singh and Sharma [13] applied Random Forest, AdaBoost and K-nearest neighbors (K-NN) to classify ten types of maneuvers (including yaw, roll, and skid) using g-forces obtained from OBD data.

Bergasa et al. [14] presented the DriveSafe smartphone app, which uses computer vision (drowsiness and distraction detection) and inertial sensors. The system evaluates driving quality in real time, achieving 82% detection accuracy and 92% completeness. Sai [15] developed this approach in DriveSafe-AI, a browser-based system based on MediaPipe and TensorFlow.js with rule-based scoring and driver state categorization (safe, warning, critical).

Jerch et al. [16] investigated the potential of vision-language models for driver monitoring by creating a labeled dataset based on Drive&Act. They demonstrated that additional training on specialized data increased the accuracy of driver action interpretation from 66 to 76%.

2.3 Using OBD-II/CAN data and telematics to analyze behavior

Most modern studies rely on data from on-board diagnostic systems and CAN-bus as the main source of objective information about driving parameters and engine operation.

Molina-Campoverde et al. [17] classified gears and analyzed the fuel efficiency of passenger cars using OBD-II PID signals (MAP, RPM, VSS) and GPS. The KNN algorithm achieved 99.7% accuracy in gear classification, and multiple linear regression allowed estimating instantaneous fuel consumption with $R^2 = 0.897$.

Ahmad et al. [18] proposed a hybrid DDD-GC-ViT transformer model for driver drowsiness detection based on OBD-II parameters (speed, throttle position, steering torque) converted into MFCC features. The classification accuracy was 97.9%, which outperformed baseline CNN models.

Nicolosi et al. [19] trained a feedforward neural network on OBD and geographic data from the DDD20 dataset (51 h, 4000 km), achieving accuracy above 98% for three driver behavior classes.

Nawarathna et al. [20] developed a transparent, rules-based scoring system based on OBD-II parameters (speed, RPM, throttle position, brake application, steering speed) with categorization of trips as "excellent," "safe," "cautious," and "risky." The system

demonstrated the ability to differentiate driving styles without the use of labeled big data.

2.4 The impact of driving style on fuel efficiency

The direct relationship between driving style and fuel consumption and energy consumption is confirmed by a number of experimental studies.

Pilnik et al. [21] developed a fuel efficiency model for corporate fleets based on telematics data, demonstrating that taking longitudinal acceleration into account improves the model's performance. Key factors influencing excess fuel consumption were identified.

Chechulin et al. [22] conducted a comparative study of urban fuel consumption for calm and aggressive driving styles on the same route. A mathematical model of driving with an acceleration limit of $\pm 1.5 \text{ m/s}^2$ was proposed, allowing for a quantitative assessment of fuel savings potential.

Algin [23] analyzed the operational factors of urban electric bus energy consumption, identifying driving style as one of the key factors (along with passenger load, rolling resistance, and obstacles). A probabilistic approach for calculating energy consumption for calm and aggressive driving styles is proposed.

Lu et al. [24] presented FedDriveScore, a federated learning framework for unsupervised privacy-preserving driver behavior scoring using homomorphic encryption. The proposed method is shown to achieve high correlation with centralized learning ($\text{MSE} < 0.0001$).

2.5 Safety and behavior prediction

A number of studies focus on the relationship between driving style and accident risks and the development of warning systems.

Lobanova [25] proposed a resource-style approach to designing the human-machine system, considering individual performance style as a compensatory mechanism for the lack of professionally important driver qualities. It has been shown that the technical characteristics of a vehicle can compensate for an insufficient level of professionally important qualities, forming a safe driving style.

Safiullin and Sorvanov [26] analyzed the application of fuzzy logic methods to assessing the risk of road accidents, taking into account weather conditions, driving style, and traffic congestion. An adaptive system based on fuzzy sets allows for the processing of high-quality data and decision-making in real time.

Jiao et al. [27] developed a risk assessment model for bus drivers that takes into account demographic characteristics, driving style, and physical and mental health. A hybrid weighting method (AHP (Analytic Hierarchy Process) + entropy) enabled drivers to be ranked according to risk level.

Tong et al. [28] assessed driver alertness on mountain roads using XGBoost and TabPFN (AUC 0.98) by integrating physiological (heart rate, eye movement) and behavioral data. The TabPFN model performed better than logistic regression and XGBoost.

Madras et al. [29] developed a personal bistability index (PBI) method – a six-component vector for multidimensional assessment of driver-operator performance based on fuzzy logic with hysteresis membership functions. The method was verified on 150 drivers in Moscow and St. Petersburg.

Gornostaev and Shevchenko [30] examined the influence of

operating modes on the safety and reliability of automotive equipment, proposing a generalized criterion for assessing driving quality.

2.6 Conclusions from the literature review

The conducted analysis shows that a robust methodological framework for driving style classification using ML/DL based on OBD-II/CAN data and telematics has now been established. However, existing studies focus primarily on passenger cars, city buses, and electric buses. Similar studies for road construction and mining equipment are virtually nonexistent. Furthermore, most approaches use either only CAN data for classification or only aggregated fuel consumption indicators, without implementing deep integration of the two data types through a common identifier. The methodology proposed in this paper fills these gaps by transferring the methodology of coordinated analysis of two dimensions from telecommunications to the transportation task of driver scoring.

In this study, the two-plane analysis methodology is conceptually adapted for the task of scoring road construction equipment operators. However, experimental validation was performed on the open VED dataset, which contains data on passenger cars and hybrids. Direct testing of the methodology on real construction equipment (excavators, graders, quarry trucks) with direct measurements of fuel consumption is planned for future studies.

3 Research methodology

3.1 General concept of two-plane analysis

The proposed methodology is based on an analogy with the method of identifying mass streaming video in LTE networks, where the signal plane (Control Plane) contains session parameters (QCI, MBR, ARP, IMSI), and the user plane (User Plane) contains the actual traffic characteristics (IP addresses, SNI, packet sizes). The connection between the planes is achieved through an end-to-end identifier (TEID).

In the transportation task (Fig. 1), the signal plane is formed by low-level CAN data received at a frequency of ≥ 1 Hz: speed, engine speed, throttle position, and the calculated acceleration and braking events. The user plane consists of aggregated energy consumption indicators: average mass air flow (MAF) or direct fuel consumption. The end-to-end identifier is the unique trip ID, formed as a combination of {vehicle_id, trip_id}.

The TEID methodology in LTE networks is based on the fact that an end-to-end identifier links the control plane (session parameters, QoS) and the user plane (IP addresses, packet sizes), allowing for increased traffic analysis accuracy without decoding the content.

In the transport problem, a similar structure is achieved as follows:

- The signal plane is formed by low-level CAN events (speed, RPM, throttle position, sudden acceleration/braking);
- the user plane is formed by aggregated energy consumption indicators (MAF or Fuel Rate);
- The end-to-end identifier is a unique trip identifier {vehicle_id, trip_id}. This formalization allows for the correlation of driver behavioral events with energy consumption without the need to model detailed physical and chemical processes of the engine.

Multimodal methodology for driving style assessment

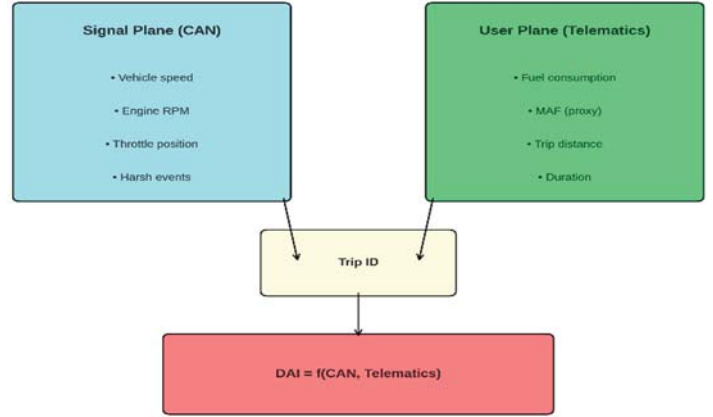


Fig. 1. Scheme of the methodology of the proposed approach (two-plane analysis)

3.2 Integral Driving Aggressiveness Index (DAI)

For each trip, the following features from the signal plane are calculated:

- std_speed – standard deviation of speed (characterizes the unevenness of movement);
- m_x_rpm – maximum engine speed;
- h_rsh_accel – number of sharp accelerations (velocity derivative > 3 m/s²);
- harsh_brake – number of sharp decelerations (velocity derivative < -3 m/s²).

All features are normalized to the range [0,1] using MinMaxScaler. The integral index DAI is calculated as a weighted sum (1):

$$DAI = \omega_1 \cdot \tilde{\sigma}_v + \omega_2 \cdot \tilde{RPM}_{max} + \omega_3 \cdot \tilde{N}_{accel} + \omega_4 \cdot \tilde{N}_{brake} \quad (1)$$

where $((\cdot))$ are normalized values, the weights satisfy the condition $\sum \omega_i = 1$. In this paper, we used weights that reflect the increased contribution of abrupt maneuvers: $\omega = 0.15; 0.25; 0.30; 0.30$. The choice of weights is justified by the results of correlation analysis (Table 4): max_rpm, harsh_accel and harsh_brake have the highest correlation with mean_maf, which is reflected in the increased weights.

3.3 Target variable

Since direct measurements of instantaneous fuel consumption are often unavailable in open datasets, trip-average mass air flow (MAF, g/s) is used as a proxy. MAF is widely used in automotive equipment as an engine load indicator and closely correlates with fuel consumption (at a constant air-fuel ratio). Validating the methodology on VED data, including MAF, allows for an objective assessment of the relationship between DAI and energy consumption. An additional advantage is that this method can also be applied to equipment equipped with diesel engines, as found in most road construction equipment.

The VED dataset includes a direct fuel consumption parameter, Fuel Rate [L/hr]. The initial version of the methodology used MAF as a proxy for fuel consumption, but to improve accuracy, it is recommended to use mean Fuel Rate as the target variable in future studies. In this paper, the results are presented for MAF; the correlation of DAI with mean Fuel Rate will be added in subsequent studies.

4 Experimental Results

4.1 Characteristics of the Data Used

To verify the methodology, we used the publicly available Vehicle Energy Dataset (VED) [31], which contains one-second CAN/OBD-II data records from 383 vehicles (both internal combustion and hybrid). The data was collected over several months in Ann Arbor, Michigan, USA. The total data size is 22 million rows (54 CSV files). After removing records with missing speed, RPM, and MAF values, and breaking down trips by Trip ID, we obtained 26,286 trips from 299 unique vehicles (each vehicle was treated as a single driver, which is acceptable due to the constant assignment).

From the entire set of features, the following were selected for this study (Table 1).

Table 1

VED dataset fields used

Field	Units	Description
VehId	–	Unique vehicle identifier
Trip	–	Unique trip identifier
Timestamp(ms)	ms	Absolute recording time
Vehicle Speed[km/h]	km/h	Instantaneous speed
Engine RPM[RPM]	RPM	Engine speed
MAF[g/sec]	g/sec	Mass air flow (fuel consumption proxy)

After removing records with missing or zero values in key fields and grouping by VehId and Trip identifiers, 26,286 trips from 299 unique vehicles were generated. Each vehicle was treated as an independent "driver," which is acceptable, as in real-world use, a vehicle is typically assigned to a single operator.

4.2 Preprocessing and feature extraction stages

All calculations were performed in Python 3.12 using the pandas, numpy, scikit-learn, and scipy libraries.

The 3 m/s² threshold was chosen based on industry guidelines for assessing aggressive maneuvers in fleet monitoring telematics systems and corresponds to short-term accelerations that significantly increase fuel consumption and transmission wear.

Main preprocessing steps:

1. timestamp conversion – Timestamp (ms) values were converted to seconds to calculate derivatives.
2. Outlier filtering – records with speeds >200 km/h or RPMs >8000 rpm (less than 0.01% of the data) were removed.
3. Speed derivative calculation – acceleration (m/s²) was calculated for each individual trip as the speed difference divided by the time difference. The resulting values were used to identify sudden accelerations and decelerations.
4. Trip feature calculation – the following were aggregated for each trip:
 - o mean_speed, std_speed – average speed and its standard deviation;
 - o max_rpm – maximum rpm;
 - o harsh_accel – number of accelerations > 3 m/s²;
 - o harsh_brake – number of decelerations < –3 m/s²;
 - o mean_maf – average air mass flow (target variable).
5. Normalization – the features included in the DAI were scaled to the range [0, 1] using MinMaxScaler.
6. DAI calculation – using formula (1) with weights [0.15; 0.25; 0.30; 0.30].
7. Driver aggregation – for each VehId, the DAI and mean_maf were averaged across all of its trips, yielding 299 points for driver-level analysis.

4.3 Statistical analysis of features

Table 2 presents the main feature statistics for the trip sample. It is clear that the values have a wide range, ensuring the data is representative.

Table 2

Descriptive statistics of features (26,286 trips)

Feature	Average	Median	Std. var.	Minimum	Maximum
std_speed, км/ч	12,84	10,92	9,31	0,00	63,70
max_rpm, об/мин	2954	2778	835	587	7821
harsh_accel	2,43	1	4,18	0	57
harsh_brake	1,89	1	3,56	0	49
mean_maf, г/с	13,47	10,28	11,96	0,18	73,44

The distribution of DAI among drivers (Figure 2a) is close to normal, indicating the absence of systematic bias. The distribution of the mean MAF is right-skewed (Figure 2b), confirming the appropriateness of using the Spearman rank correlation instead of the Pearson one. The Scheer-Wilk test for mean_maf showed a violation of normality ($p < 0.001$), while the distribution of DAI is close to normal.

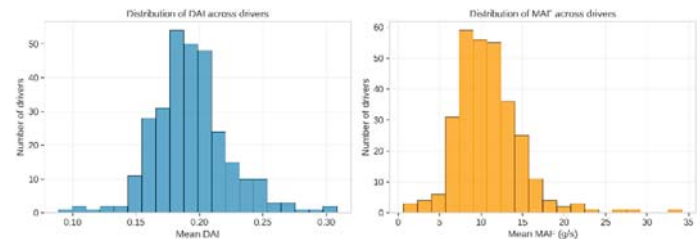


Fig. 2. Distribution of average DAI and average MAF by drivers

4.4. Correlation analysis

To assess the relationship between DAI and average MAF, we used the Spearman rank correlation coefficient (ρ), which is robust to outliers and does not require a normal distribution. The results are presented in Table 3.

Table 3

Correlation of DAI with average MAF

Aggregation level	Number of observations	Spearman's coefficient (ρ)	95% confidence interval	p-value
Trips	26 286	0,280	[0,270; 0,290]	< 0,0001
Drivers (average)	299	0,292	[0,180; 0,398]	< 0,0001

According to the generally accepted scale for interpreting the Spearman rank correlation coefficient, values of $\rho \approx 0.1$ –0.3 correspond to a weak relationship, while 0.3–0.5 correspond to a moderate relationship. The obtained values of $\rho \approx 0.28$ –0.29 correspond to a weak positive correlation, which, with a sample size of $N > 26,000$, is statistically highly significant ($p < 0.0001$).

The confidence interval for the driver level ([0.18; 0.40]) is wider than for the trip level ([0.27; 0.29]), which is due to the smaller number of observations ($N=299$) and the increasing uncertainty when averaging across trips. This emphasizes the importance of interpreting the result as a weak but systematic relationship.

The scatter plots (Figures 3 and 4) clearly demonstrate a positive slope for the regression line, confirming that an increase in DAI is accompanied by an increase in the average MAF. The points in the driver plot (Figure 4) are more densely clustered than those for individual trips, as expected due to noise averaging.

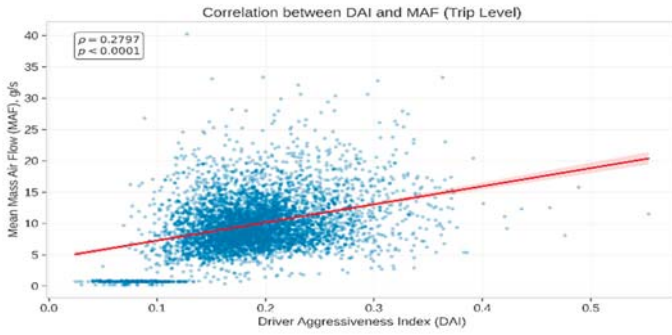


Fig. 3. Correlation between DAI and average MAF (trip level)

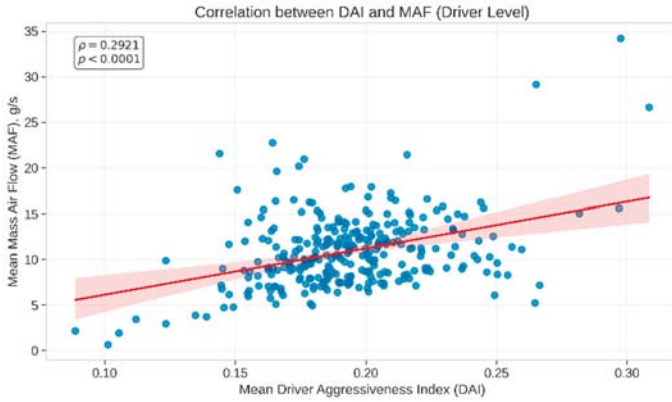


Fig. 4. Correlation between DAI and average MAF (driver level)

4.5 Analysis of the contribution of individual features

To understand which DAI components contribute most to MAF prediction, pairwise correlations of each feature with the target variable were calculated (Table 4).

Table 4

Correlation of individual features with mean_maf (trip level)

Sign	Spearman's coefficient (ρ)	p-value
std_speed	0,324	< 0,0001
max_rpm	0,560	< 0,0001
harsh_accel	0,476	< 0,0001
harsh_brake	0,412	< 0,0001

The highest correlation is observed for max_rpm ($\rho = 0.56$), which is physically understandable: higher engine speeds require increased air-fuel mixture delivery. Sharp accelerations ($\rho = 0.48$) and braking ($\rho = 0.41$) also significantly correlate with air flow. The standard deviation of speed has the smallest, but still significant, contribution ($\rho = 0.32$). These results justify the chosen weights in the DAI.

The maximum pairwise correlation (Figure 5) between harsh_accel and harsh_brake is 0.894, indicating a high correlation between these features. While this does not constitute critical multicollinearity for a simple linear combination in DAI, future work is recommended to consider combining these features into a single "harsh maneuvers" index or using regularization methods (Ridge, Lasso) to assess the stability of the weights.

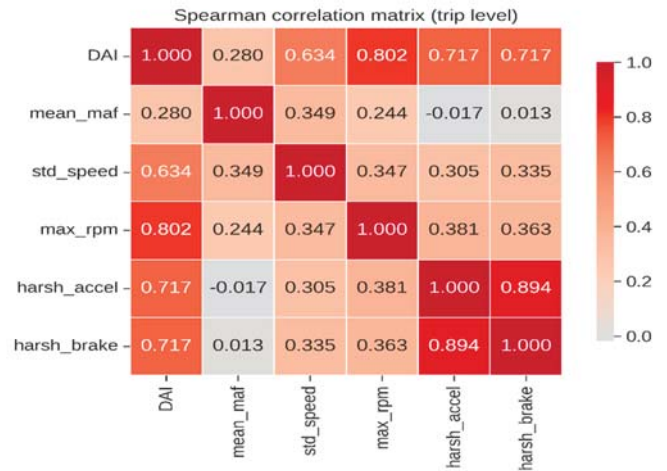


Fig. 5. Matrix of feature correlations (trip level)

4.6 Discussion of restrictions

Several limitations of the study should be noted:

1. Using the MAF as a proxy for fuel consumption – although the MAF correlates well with fuel consumption under steady-state conditions, during transients (sharp acceleration) deviations are possible due to mixture enrichment. The VED dataset lacks a direct fuel_rate (l/h), necessitating the use of an indirect indicator.

2. The VED dataset includes parameters such as Air Conditioning Power, Heater Power, HV Battery Current, and HV Battery SOC, which affect the MAF but are not directly related to driving style. In the current version of the methodology, these factors are not aggregated and may introduce noise into the correlation. Furthermore, the VED contains data for 27 PHEV/EV and 92 HEV vehicles, for which the MAF may be zero or incorrect; in future studies, it is recommended to conduct a separate analysis for ICE vehicles.

3. Lack of a labeled driving style – we do not have external benchmarks (expert assessments, questionnaires), so validation is based only on an objective criterion – energy consumption.

4. route homogeneity – VED data are collected from one city (Ann Arbor), which may limit generalizability to other regions and road types.

5. Applicability to road construction equipment – despite the transfer of the methodology, direct extrapolation to excavators, graders, or quarry trucks requires additional experiments with real data from such machines, as their dynamic modes differ significantly from those of passenger cars.

All of the above limitations do not reduce the value of the proposed methodology, but should be taken into account when interpreting the results.

5 Conclusions

This paper proposes a multimodal method for integrated driving style assessment based on the coordinated use of CAN data (signal plane) and energy consumption indicators (user plane) with an end-to-end trip identifier. The methodology borrows a successful telecommunications approach (correlation via TEID) and adapts it to the transportation task of driver scoring.

Using the open VED dataset, containing one-second recordings of 299 vehicles (26,286 trips), we experimentally confirmed that the proposed driving aggressiveness index (DAI) significantly correlates with average mass air flow ($\rho = 0.292$, $p < 0.0001$ at the driver level). This confirms the presence of a statistically significant weak positive relationship between DAI and energy consumption, allowing us to consider DAI as an objective measure of driving style correlated with fuel efficiency.

Main scientific results:

- A formal two-dimensional model for driver scoring was developed.
- An integrated driver assessment index (DAI) was proposed and verified.
- A statistically significant relationship between DAI and energy consumption was demonstrated using real-world data.

The practical significance of this work lies in the possibility of creating fleet monitoring systems that, using CAN/OBD data, calculate DAI in real time and provide driver feedback. This is particularly relevant for road construction equipment due to high fuel consumption and operating costs.

Future research directions include:

- Collection of a specialized dataset on real road construction equipment (excavators, graders, dump trucks) with direct measurements of fuel consumption.
- Optimization of DAI weights using regression or reinforcement learning methods.
- Integration of DAI into on-board ADAS systems for personalized driver assistance.

References

- [1] V. I. Cherenkov and V. S. Ivanov, "Analysis of modern driving style control technologies for drivers and operators of public transport," in *Innovative, Information and Communication Technologies*, Sochi, Russia, Oct. 1–10, 2024, pp. 302–306. (in Russian)
- [2] E. O. Melikhov and E. P. Stroganova, "Using 4G network interfaces for video streaming detection: A methodology for the coordinated use of signaling and user data," *T-Comm: Telecommun. Transp.*, vol. 20, no. 1, pp. 42–51, 2026, doi: 10.36724/2072-8735-2026-20-1-42-51.
- [3] R. R. Kiyamov and M. S. Moseva, "A review of machine learning methods for driver classification," *Eng. Bull. Don*, no. 7(115), pp. 59–73, 2024. (in Russian)
- [4] E. Michailidis, A. Panagiotopoulou, and A. Papadakis, "A review of OBD-II-based machine learning applications for sustainable, efficient, secure, and safe vehicle driving," *Sensors*, vol. 25, p. 4057, 2025, doi: 10.3390/s25134057.
- [5] V. Shirole, A. K. Shahade, and P. V. Deshmukh, "A comprehensive review on data-driven driver behaviour scoring in vehicles: technologies, challenges and future directions," *Discov. Artif. Intell.*, vol. 5, p. 26, 2025, doi: 10.1007/s44163-025-00244-6.
- [6] M. H. Mobini Seraji, S. Shaffiee Haghsheenas, S. Shaffiee Haghsheenas et al., "A state-of-the-art review on machine learning techniques for driving behavior analysis: clustering and classification approaches," *Complex Intell. Syst.*, vol. 11, p. 386, 2025, doi: 10.1007/s40747-025-01988-5.
- [7] C. Wang, R. Fu, J.-S. Peng, and J. Mao, "Driving style classification method for lane change warning system," *J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol.*, vol. 14, pp. 187–193+200, 2014.
- [8] E. Szumska and T. Stańczyk, "Preliminary driving style classification of the professional drivers," *Arch. Automot. Eng. – Archiwum Motoryzacji*, vol. 98, pp. 25–39, 2022, doi: 10.14669/AM/157998.
- [9] D. Zhao, Z. Fu, C. Liu, J.-J. Hou, S. Dong, and Y. Zhong, "Starting driving style recognition of electric city bus based on deep learning and CAN data," *Transport*, vol. 39, pp. 229–239, 2024, doi: 10.3846/transport.2024.22749.
- [10] X. Nie, X. Lin, Z. Li, and B. Ji, "Driving style recognition for commercial vehicles based on multi-scale convolution and channel attention," *Appl. Sci.*, vol. 16, p. 1925, 2026, doi: 10.3390/app16041925.
- [11] B. Sun, Z. Zhan, Q. Mao, L. Wen, Z. Yi, and X. Lihong, "Enhanced clustering and comprehensive scoring based driver behavior safety assessment method," *SAE Tech. Paper*, no. 2023-01-7069, 2023, doi: 10.4271/2023-01-7069.
- [12] R. Kumar and A. Jain, "Driving behavior analysis and classification by vehicle OBD data using machine learning," *J. Supercomput.*, vol. 79, pp. 18800–18819, 2023, doi: 10.1007/s11227-023-05364-3.
- [13] S. Singh and A. Sharma, "Revving up insights: machine learning-based classification of OBD II data and driving behavior analysis using g-force metrics," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 14, pp. 2188–2197, 2025, doi: 10.11591/eei.v14i3.9398.
- [14] L. Bergasa, D. Almería, J. Almazán, J. Yebes, and R. Arroyo, "DriveSafe: an App for alerting inattentive drivers and scoring driving behaviors," in *IEEE Intell. Veh. Symp. Proc.*, 2014, doi: 10.1109/IVS.2014.6856461.
- [15] S. Sai, "DriveSafe-AI: A real-time browser-based system for driver drowsiness and distraction detection," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 14, pp. 941–949, 2026, doi: 10.22214/ijraset.2026.77977.
- [16] D. Lerch, S. Mulgurthi, M. Martin, F. Diederichs, and R. Stiefelwagen, "Vision-language models for driver monitoring systems: A driver activity description dataset," *arXiv*, 2026, doi: 10.48550/arXiv.2606.02273.
- [17] J. Molina-Campoverde, J. Zurita-Jara, and P. Molina Campoverde, "Driving pattern analysis, gear shift classification, and fuel efficiency in light-duty vehicles: A machine learning approach using GPS and OBD II PID signals," *Sensors*, vol. 25, p. 4043, 2025, doi: 10.3390/s25134043.
- [18] K. Ahmad, P. P. Em, and N. Aziz, "Enhancing driver drowsiness detection using OBD-II and MFCC features: A transformer based approach," in *IEEE MECON 2025*, 2025, doi: 10.1109/MECON67253.2025.11277067.
- [19] V. Nicolosi, M. Mameli, S. Shiralizadeh, I. Coltea, M. D'Apuzzo, and G. Cappelli, "Interactions between drivers and road infrastructure characteristics: Combining OBD and geographic data to classify driver behaviors with feed-forward neural network," in *Proc. Conf.*, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-97638-4_4.
- [20] B. M. S. U. Nawarathna, R. Wimalasiri, and N. C. Wanigasuriya, "A rule-based scoring method for driver behaviour evaluation using vehicular parameters," in *Proc.*, 2025, pp. 506–512, doi: 10.65646/3rc20dmnlw0506.
- [21] N. P. Pilnik, I. P. Stankevich, E. E. Abushova, and D. A. Petrova, "Modeling fuel efficiency in corporate fleets using telematics data," *Reg. Econ. Theory Pract.*, vol. 23, no. 1, pp. 104–126, 2025, doi: 10.24891/re.23.1.104. (in Russian)
- [22] A. I. Chechulin, M. L. Shabolin, and B. A. Safonov, "Study of fuel economy of a passenger car under different driving styles in urban conditions," *Mach. Plants Des. Dev. Oper.*, no. 3, pp. 44–60, 2025. (in Russian)
- [23] V. Algin, "Main operational factors determining the energy consumption of the urban electric bus: schematization and modelling," *Preprint*, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.32154.80328.
- [24] L. Lu, X. Chu, A. Guo, Y. Fang, B. Martinez-Pastor, and R. Teixeira, "Cross-vehicle federated learning for unsupervised scoring of driver behavior under privacy constraint," *IEEE Internet Things J.*, vol. PP, no. 1, p. 1, 2024, doi: 10.1109/IIOT.2024.3494716.
- [25] Y. I. Lobanova, "On the possibility of ensuring road safety based on designing a human-machine system using a resource-style approach," in *Complex Nature of Sustainable Development and Safety in Key Spheres of Human Activity*, St. Petersburg, Russia, Apr. 21–27, 2022, pp. 26–35. (in Russian)
- [26] R. N. Safiullin and A. V. Sorvanov, "Analysis of fuzzy logic methods for vehicle safety," *Socio-Econ. Tech. Syst. Res. Des. Optim.*, no. S2(100), pp. 78–82, 2025. (in Russian)

[27] Y. Jiao, X. Wang, A. Morris, Y. Huang, and M. Wu, "Risk assessment of bus drivers considering physical and psychological health using a risk scoring model," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2680, 2025, doi: 10.1177/03611981251362139.

[28] L. Tong, D. Xie, T. Liu, J. Shan, and C. Tang, "Prediction of driver alertness levels on mountain roads using machine learning models: A naturalistic driving study in China," *Traffic Inj. Prev.*, pp. 1–10, 2025, doi: 10.1080/15389588.2025.2577155.

[29] E. E. Medres, S. A. Evtyukov, Ya. V. Vasiliev, and A. I. Solodkii, "Method of personal bistability index of drivers for diagnosing their

driving style and predicting behavior in heavy traffic flow," *Bull. Donetsk Acad. Transp.*, no. 1, pp. 129–138, 2026. (in Russian)

[30] A. I. Gornostaev and K. A. Shevchenko, "Influence of operating modes on safety and reliability of automotive equipment," *Sci. Reserve*, no. 2(14), pp. 27–32, 2021. (in Russian)

[31] G. S. Oh, D. Leblanc, and H. Peng, "Vehicle Energy Dataset (VED)," *IEEE Dataport*, 2019, doi: 10.21227/pg3m-5m57. Accessed: Jun. 9, 2026. [Online]. Available: <https://iee-dataport.org/open-access/vehicle-energy-dataset-ved>

МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СТИЛЯ ВОЖДЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ СОГЛАСОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ CAN-ДАННЫХ И ТЕЛЕМАТИКИ

Смирнов Петр Ильич, Вологодский государственный университет, Вологда, Россия, smirnovpi@vogu35.ru

Валяев Олег Алексеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, o.valyaev@madi.ru

Баурова Наталья Ивановна, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, nbaurova@mail.ru

Мазлумян Григорий Сергеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, g.mazlumyan@madi.ru

Субботин Борис Сергеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия, bsubbotin@mail.ru

Аннотация

Эксплуатация дорожно-строительной техники связана с высокими затратами топлива и интенсивным износом узлов, которые в значительной степени определяются стилем вождения оператора. В работе предлагается мультимодальная методика интегральной оценки стиля вождения, основанная на согласованном применении низкоуровневых CAN-данных (сигнальная плоскость) и агрегированных показателей расхода топлива (пользовательская плоскость) с использованием сквозного идентификатора поездки. В отличие от существующих подходов, ориентированных на классификацию стиля по отдельным параметрам, предложенная методика позволяет формировать интегральный индекс агрессивности вождения (Driver Aggressiveness Index, DAI), коррелирующий с топливной эффективностью. Валидация выполнена на открытом датасете Vehicle Energy Dataset (VED), содержащем секундные CAN-записи 299 автомобилей (26 286 поездок). Показано, что DAI имеет значимую положительную корреляцию со средним массовым расходом воздуха (MAF), используемым в качестве прокси расхода топлива: на уровне поездок $r = 0,280$ ($p < 0,0001$), на уровне водителей $r = 0,292$ ($p < 0,0001$). Научная новизна заключается в переносе методологии согласованного анализа двух плоскостей (аналогично TEID в сетях LTE) в задачу скоринга водителей, а также в адаптации подхода для дорожно-строительной техники. Практическая значимость состоит в создании основы для систем мониторинга автопарков, позволяющих снижать расход топлива и эксплуатационные расходы за счёт объективной оценки стиля вождения.

Ключевые слова: стиль вождения, CAN-шина, телематика, скоринг водителей, мультимодальный анализ, идентификатор поездки, дорожно-строительная техника, топливная эффективность

Литература

1. Черенков В.И., Иванов В.С. Анализ современных технологий контроля стиля вождения водителей и машинистов общественного транспорта // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции, Сочи, 01-10 октября 2024 года. М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2024. С. 302–306. EDN DWXNEM.
2. Мелихов Е.О., Строганова Е.П. Использование интерфейсов сети четвертого поколения для выявления потокового видео: методика согласованного применения сигнальных и пользовательских данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Т. 20, № 1. С. 42–51. DOI 10.36724/2072-8735-2026-20-1-42-51.
3. Киямов Р.Р., Мосева М.С. Обзор методов машинного обучения в задаче классификации водителей // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7(115). С. 59–73. EDN GGVVBK.
4. Michailidis E., Panagiotopoulou A., Papadakis A. A Review of OBD II Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving // *Sensors*. 2025. Vol. 25, P. 4057. DOI 10.3390/s25134057.
5. Shirole V., Shahade A.K., Deshmukh P.V. A comprehensive review on data driven driver behaviour scoring in vehicles: technologies, challenges and future directions // *Discover Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 5, P. 26. DOI 10.1007/s44163-025-00244-6.
6. Mobini Seraji M.H., Shaffiee Haghsheenas S., Shaffiee Haghsheenas S. et al. A state of the art review on machine learning techniques for driving behavior analysis: clustering and classification approaches // *Complex Intelligent Systems*. 2025. Vol. 11, P. 386. DOI 10.1007/s40747-025-01988-5.

7. Wang C., Fu R., Peng J. S., Mao J. Driving style classification method for lane change warning system // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2014. Vol. 14, pp. 187-193+200.
8. Szumska E., Stańczyk T. Preliminary driving style classification of the professional drivers // The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji. 2022. Vol. 98, pp. 25-39. DOI 10.14669/AM/157998.
9. Zhao D., Fu Z., Liu C., Hou J. J., Dong S., Zhong Y. Starting driving style recognition of electric city bus based on deep learning and CAN data // Transport. 2024. Vol. 39, pp. 229-239. DOI 10.3846/transport.2024.22749.
10. Nie X., Lin X., Li Z., Ji B. Driving Style Recognition for Commercial Vehicles Based on Multi Scale Convolution and Channel Attention // Applied Sciences. 2026. Vol. 16, P. 1925. DOI 10.3390/app16041925.
11. Sun B., Zhan Z., Mao Q., Wen L., Yi Z., Lihong X. Enhanced Clustering and Comprehensive Scoring Based Driver Behavior Safety Assessment Method // SAE Technical Paper. 2023. No. 2023-01-7069. DOI 10.4271/2023-01-7069.
12. Kumar R., Jain A. Driving behavior analysis and classification by vehicle OBD data using machine learning // The Journal of Supercomputing. 2023. Vol. 79, pp. 18800-18819. DOI 10.1007/s11227-023-05364-3.
13. Singh S., Sharma A. Revving up insights: machine learning based classification of OBD II data and driving behavior analysis using g force metrics // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2025. Vol. 14, pp. 2188-2197. DOI 10.11591/eei.v14i3.9398.
14. Bergasa L., Almeria D., Almazin J., Yebes J., Arroyo R. DriveSafe: an App for Alerting Inattentive Drivers and Scoring Driving Behaviors // IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. 2014. DOI 10.1109/IVS.2014.6856461.
15. Sai S. DriveSafe AI: A Real Time Browser Based System for Driver Drowsiness and Distraction Detection // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2026. Vol. 14, pp. 941-949. DOI 10.22214/ijraset.2026.77977.
16. Lerch D., Mulgurthi S., Martin M., Diederichs F., Stiefelwagen R. Vision language Models for Driver Monitoring Systems: A Driver Activity Description Dataset // arXiv. 2026. DOI 10.48550/arXiv.2606.02273.
17. Molina Campoverde J., Zurita Jara J., Molina Campoverde P. Driving Pattern Analysis, Gear Shift Classification, and Fuel Efficiency in Light Duty Vehicles: A Machine Learning Approach Using GPS and OBD II PID Signals // Sensors. 2025. Vol. 25, P. 4043. DOI 10.3390/s25134043.
18. Ahmad K., Em P.P., Aziz N. Enhancing Driver Drowsiness Detection Using OBD II and MFCC Features: A Transformer Based Approach // IEEE MECON 2025. 2025. DOI 10.1109/MECON67253.2025.11277067.
19. Nicolosi V., Mameli M., Shiralizadeh S., Coltea I., D'Apuzzo M., Cappelli G. Interactions Between Drivers and Road Infrastructure Characteristics: Combining OBD and Geographic Data to Classify Driver Behaviors with Feed Forward Neural Network // (книга/конференция). 2025. DOI 10.1007/978-3-031-97638-4_4.
20. Nawarathna B.M.S.U., Wimalasiri R., Wanigasuriya N.C. A rule based scoring method for driver behaviour evaluation using vehicular parameters // Proceedings. 2025, pp. 506-512. DOI 10.65646/3rc20dmnlw0506.
21. Пильник Н.П., Станкевич И.П., Абушова Е.Е., Петрова Д.А. Моделирование топливной эффективности в корпоративных автопарках с использованием телематических данных // Региональная экономика: теория и практика. 2025. Т. 23, № 1. С. 104-126. DOI 10.24891/re.23.1.104. EDN TDVLMH.
22. Чечулин А.И., Шаболин М.Л., Сафонов Б.А. Исследование топливной экономичности легкового автомобиля в различных стилях вождения в условиях городского движения // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2025. № 3. С. 44-60. EDN AHNLUW.
23. Algin V. Main operational factors determining the energy consumption of the urban electric bus: schematization and modelling // Preprint. 2019. DOI 10.13140/RG.2.2.32154.80328.
24. Lu L., Chu X., Guo A., Fang Y., Martinez Pastor B., Teixeira R. Cross Vehicle Federated Learning for Unsupervised Scoring of Driver Behavior Under Privacy Constraint // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. PP, No. 1. P. 1-11. DOI 10.1109/JIOT.2024.3494716.
25. Лобанова Ю.И. О возможности обеспечения безопасности дорожного движения на основе проектирования системы человек машина на базе ресурсно стиливого подхода // Комплексный характер устойчивого развития и безопасность в основных сферах человеческой деятельности. Развитие и стабильность : Материалы Международной научной сессии, Санкт Петербург, 21-27 апреля 2022 года. СПб. : Петрополис, 2022. С. 26-35. EDN DMTONU.
26. Сафиуллин Р.Н., Сорванов А.В. Анализ использования методов нечёткой логики в обеспечении безопасности транспортных средств // Социально экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2025. № S2(100). С. 78-82. EDN XJQZDI.
27. Jiao Y., Wang X., Morris A., Huang Y., Wu M. Risk Assessment of Bus Drivers Considering Physical and Psychological Health Using a Risk Scoring Model // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2025. Vol. 2680. DOI 10.1177/03611981251362139.
28. Tong L., Xie D., Liu T., Shan J., Tang C. Prediction of driver alertness levels on mountain roads using machine learning models: A naturalistic driving study in China // Traffic Injury Prevention. 2025, pp. 1-10. DOI 10.1080/15389588.2025.2577155.
29. Медрес Е.Е., Евтюков С.А., Васильев Я.В., Солодкий А.И. Метод личностного индекса бистабильности водителей для диагностики их стиля вождения и прогнозирования поведения в условиях насыщенного транспортного потока // Вестник Донецкой академии транспорта. 2026. № 1. С. 129-138. EDN ENVKLY.
30. Горностаев А.И., Шевченко К.А. Влияние эксплуатационных режимов на безопасность и надежность эксплуатации автомобильной техники // Научный резерв. 2021. № 2(14). С. 27-32. EDN DYNJQD.
31. Oh G.S., Leblanc D., Peng H. Vehicle Energy Dataset (VED) [Электронный ресурс] // IEEE Dataport. 019. DOI 10.21227/pg3m-5m57. Режим доступа: <https://iee-dataport.org/open-access/vehicle-energy-dataset-ved> (дата обращения: 09.06.2026).

Информация об авторах:

Смирнов Петр Ильич, Вологодский государственный университет, Институт машиностроения, энергетики и транспорта, кафедра "Автомобили и автомобильное хозяйство", доцент, к.т.н., Вологда, Россия. orcid.org/0000-0002-9405-7248

Валеев Олег Алексеевич, ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", Институт автомобильной и специальной техники и инжиниринга, кафедра "Транспортные установки", старший преподаватель, Москва, Россия. ORCID 0009-0000-1025-8388

Баурова Наталья Ивановна, ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", Институт автомобильной и специальной техники и инжиниринга, кафедра "Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных машин", профессор, д.т.н., Москва, Россия. ORCID 0000-0001-9529-2031

Мазлумян Григорий Сергеевич, ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", проректор по научной работе, к.т.н., Москва, Россия. ORCID 0009-0001-9296-0775

Субботин Борис Сергеевич, ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", старший научный сотрудник, к.т.н., ФГБОУ ВО "РГУ им. А.Н. Косыгина", доцент, к.т.н., Москва, Россия. ORCID 0000-0003-1685-082X

организаторы:
RUSSIA SECTION CAS CHAPTER
INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS (IRIS)

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**“2026 Systems of Signal Synchronization, Generating
and Processing in Telecommunications”**
SYNCHROINFO

30 июня – 3 июля 2026
г. Петрозаводск, Россия

The papers which are discussed at the conference can be divided into the following chapters:

- 1) Synchronization Systems and Devices;**
- 2) Signal Generating and Shaping Devices;**
- 3) Signal Processing Devices.**
- 4) Special chapter: “Problems of microwave electronics” named after V.A. Solntsev**
- 5) Photonics and mathematics for moving objects**
- 6) Synchronization of information technology processes and technological controlling**
- 7) Optical Methods and Devices**



All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore

Materials are available in English

<http://media-publisher.ru/en/conference/>