



Том 11. № 5
2025

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

ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Темы номера:

- ✓ Сеть вычислительных мощностей
- ✓ Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах
- ✓ Исследование характера задержек видеопотока при реализации услуги FPV-управления через различные космические сегменты гибридной орбитально-наземной сети связи

Vol. 11. Iss. 5
2025

PROCEEDINGS
OF TELECOMMUNICATION UNIVERSITIES

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

Научный журнал

ТРУДЫ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Том 11. № 5

Proceedings of Telecommunication Universities

Vol. 11. Iss. 5

Санкт-Петербург

2025

Описание журнала

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

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

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

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

Редакционный совет

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

Description

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

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs

2.2.6. Optical and optoelectronic devices and complexes

2.2.13. Radio engineering, including television systems and devices

2.2.14. Antennas, microwave devices and its technologies

2.2.15. Systems, networks and telecommunication devices

2.2.16. Radiolocation and radio navigation

2.3.1. System analysis, management and information processing, statistics

2.3.6. Methods and systems of information security, cybersecurity

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕГИСТРАЦИОННАЯ ИНФОРМАЦИЯ / REGISTRATION INFORMATION

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

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

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

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



Товарный знак № 929373.

Правообладатель:

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

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

Trademark No. 929373.

Copyright holder:

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / CONTACT INFORMATION

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

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

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

Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022

E-mail: tuzs@sut.ru

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

ВК: <http://vk.com/spbtuzs>

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**, изображение на обложке сгенерировано ИИ freepik <https://ru.freepik.com/ai>

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

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

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

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

E-mail: tuzs@sut.ru

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

Executive Editor **Tatarnikova I.M.**

Commissioning Editor **Yashugin D.N.**

Design: **Korovin V.M.**, cover image generated by AI freepik <https://ru.freepik.com/ai>

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ / IMPRINT

Дата выхода в свет: 05.11.2025
Тираж: 1000 экз. Цена свободная.

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

Release date: 05.11.2025
Circulation: 1000 copies. Free price.

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



95 лет СПбГУТ – вехи истории

13 октября 1930 г. вышло постановление Совнаркома СССР об организации на базе Высших инженерных курсов переподготовки инженеров связи Ленинградского института инженеров связи (ЛИИС), объединившего научно-техническую интеллигенцию в целях разработки передовых технологий в области связи. В 1938 г. ЛИИС был переименован в ЛЭИС – Ленинградский электротехнический институт связи, а 8 июня 1940 г. институту было присвоено имя проф. М.А. Бонч-Бруевича. В 1993 г. вуз был переименован в Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Идея о новом названии университета – **Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций** (СПбГУТ) была высказана проф. Сиверсом М.А. В сохранении имени проф. М.А. Бонч-Бруевича в названии университета непосредственное участие принял проф. Гоголь А.А.

95-летняя история СПбГУТ представляется временными периодами, связанными с деятельностью его руководителей.

Руководитель вуза		Годы работы	Вехи вуза
Парижер Семен Савич , первый директор института, выпускник Политехнического института в Карлсруэ, член ВКП(б) с 1901 г.		1930-1931	На первый курс только что образованного института было принято 662 человека. В том же году открылись рабфак и техникум связи.
Панов Николай Николаевич , член РСДРП с 1905 г.	1931-1935	Продолжились мероприятия по усовершенствованию работы вуза: было учреждено вечернее отделение, созданы издательский и научно-исследовательский сектора; 1932 г. – первый выпуск инженеров связи.	
Иванов Константин Евстафьевич , член Ленинградского совета, член ВКП(б) с 1918 г.	1935-1937	Вузу было предоставлено право приема и защиты диссертаций и присуждения степеней кандидата технических наук. В 1935 г. состоялся первый выпуск радиофакультета, 1937 г. – первый выпуск аспирантов.	
Сидоров Федор Ефимович , профессиональный военный, окончил Военно-электротехническую академию РККА. В годы Великой Отечественной войны был отозван в Наркомат связи, руководил подготовкой связистов для армии	1937-1941 1944-1945	К 1941 г. в институте уже обучались 1 400 студентов, было открыто 40 научных и учебных лабораторий, 23 кафедры, в том числе телефонии, телеграфии, телевидения, радиопередающих устройств, радиовещания и акустики, антенн и распространения радиоволн. В августе 1944 г., после снятия блокады Ленинграда, ЛЭИС вернулся в родной город. Благодаря усилиям коллектива институт быстро возобновил свою работу.	
Каменев Михаил Андреевич , бывший зам. директора института по административно-хозяйственной части. Исполнял обязанности директора во время эвакуации в Тбилиси и во время возвращения института обратно в Ленинград	1941-1944	После начала войны в июне 1941 г. ЛЭИС перестроил свою работу на военный лад. Большая часть преподавателей, сотрудников и студентов ушла на фронт. Оставшиеся в стенах института выполняли военные заказы. Кафедры вуза переключились на производство снарядов, приборов для ВМФ и радиостанций.	
Степанов Сергей Васильевич , профессор	1945-1956	Под его руководством были открыты научно-исследовательские лаборатории и приобретено современное оборудование. Была проведена первая научно-техническая конференция.	
Муравьев Константин Хрисанфович , генерал-лейтенант войск связи, кандидат военных наук, профессор	1956-1971	Были открыты радиотехнический и конструкторский факультеты, завод-втуз. В 1957 г. в ЛЭИС на третий курс было принято большое количество (практически две полуроты) курсантов в Военной академии связи им. С.М. Буденного, которые подлежали сокращению в связи с проводимым в то время сокращением вооруженных сил в СССР. В 1959 г. под руководством доцента Неймана С.М. был разработан и изготовлен первый отечественный образец электрографического копировального аппарата (прототип современных ксероксов). Устройство демонстрировалось на выставке достижений народного хозяйства (ВДНХ). За эту разработку ЛЭИС был награжден Дипломом первой степени, а Нейман С.М. – большой золотой медалью. Впоследствии был налажен серийный выпуск электрографической копировальной машины с названием РЭМ. Открылись научно-исследовательские лаборатории: проблемная и отраслевая при кафедре телевидения, отраслевая лаборатория вычислительной техники, передачи дискретной информации, оптической связи и радиотехники. Начал выходить Сборник трудов институтов связи. Институт расширился за счет второго учебного корпуса на наб. р. Мойки, 65. Были открыты полигон и база в Воейково. Активно действовало студенческое научное общество (СНО), председатель СНО института Когновицкий О.С. за хорошее обеспечение руководства научной работой студентов награжден Почетной грамотой Ленинградского областного комитета профсоюза работников просвещения, высшей школы и научных учреждений. В период 1965–1970 гг. по заданию Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР коллективом кафедры передачи дискретной информации и телеграфии была разработана автоматизированная система сбора и регистрации гидрологической информации, в дальнейшем рекомендованная к серийному производству. За разработку этой системы ее разработчики были награждены серебряными и бронзовыми медалями. В феврале 1968 г. в «Ленинградской правде» была опубликована статья об этой системе под названием «Кибернетический гидролог».	
Миронов Виктор Михайлович , кандидат технических наук, профессор	1972-1975	Был проведен ряд научно-исследовательских работ на базе научно-учебного полигона в Воейково по тропосферной и ионосферной связи. В 1972 г. в ЛЭИС были образованы два ведущих связных факультета – многоканальной электрической связи (МЭС) и автоматической электросвязи (АЭС).	
Куликовский Юрий Петрович , доктор технических наук, профессор	1975-1983	В 1978 г. была осуществлена закладка учебно-лабораторного корпуса на пр. Большевиков. Коллектив изобретателей и рационализаторов ЛЭИС за успехи, достигнутые в 1980 г., награжден Почетной грамотой Президиума Ленинградского областного совета ВОИР. В 1982 г. ЛЭИС награжден Переходящим Красным Знаменем за 1 место среди ВУЗов в смотре-конкурсе оборонно-массового и военно-патриотического воспитания студентов. В 1982 г. организована первая в стране кафедра оптических систем передачи информации.	

Гомзин Вадим Николаевич , доктор технических наук, профессор	1983-1989	Продолжено строительство нового учебного корпуса на пр. Большевиков, введен в эксплуатацию новый вычислительный центр на базе ЕС-1035. Открыто новое общежитие в поселке Рыбацком. В 1988 г. образована кафедра автоматизации предприятий связи. Проведены научно-исследовательские работы по построению сети передачи данных Ленинграда в соответствии с Территориальной отраслевой программой интенсификации развития Ленинградского народно-хозяйственного комплекса на основе автоматизации с широким использованием вычислительной техники на период до 1990 г. («Интенсификация-90»).
Сиверс Мстислав Аркадьевич , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиопередающих устройств и средств подвижной связи, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР	1989-1996	В 1993 г. ЛЭИС переименован в СПбГУТ. Была создана кафедра цифровой обработки сигналов. Открыт новый учебно-лабораторный корпус в Невском районе. Образованы факультет экономики и управления и департамент гуманитарной подготовки (ДГП). Факультет АЭС переименован в факультет сетей связи, систем коммутации и вычислительной техники. На кафедре цифровой вычислительной техники и информатики открылась новая специальность – «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», а на кафедре обработки и передачи дискретных сообщений – «Автоматизированные системы обработки информации и управления».
Галкин Сергей Леонидович , доктор физико-математических наук, профессор	1997-1998	Открыта новая кафедра систем связи, созданы департамент фундаментальной подготовки, институт радиотехники и радиоэлектроники; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем. Был образован гуманитарный факультет.
Гоголь Александр Александрович , доктор технических наук, профессор, Мастер связи, Почетный радист, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки	1999-2011	В СПбГУТ вошли Санкт-Петербургский колледж телекоммуникаций им. Э.Т. Кренкеля, а также Архангельский и Смоленский колледжи телекоммуникаций. Создан институт информационных технологий. В 2000 г. при НПО «Импульс» была организована базовая кафедра, которая проводила подготовку специалистов в рамках факультета ИКСС по новому направлению – «Автоматизированные системы обработки информации и управления». С ноября 2008 г. началось строительство второго учебного корпуса СПбГУТ на проспекте Большевиков произведен капремонт УЛК 1 на проспекте Большевиков, удовлетворяющий современным требованиям высшего образования. Реконструкция корпуса позволила организовать учебный процесс на качественно новом уровне. Значительно расширены международные связи университета. В 2009 г. проведен 4-й международный форум руководителей университетов в телекоммуникационном профиле, в котором приняли представители более 50 стран. Впервые реализована социально-ориентированная программа «Каждому студенту – персональный компьютер» (было выдано 12 тыс. ПК), что значительно повысило имидж и качество подготовки специалистов в университете.
Бачевский Сергей Викторович , доктор технических наук, профессор, награжден Премией Правительства Санкт-Петербурга «За выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования»; удостоен Почетными грамотами Министерства связи и массовых коммуникаций, Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга	2012-2022	Продолжилась работа в области международной стандартизации – СПбГУТ вступил в члены Международного союза электросвязи. Создана базовая кафедра ФГУП РТРС. Университет включен в пятерку лучших технических вузов Петербурга по качеству приема абитуриентов. Открыта новая лаборатория моделирования и оптимизации. По итогам мониторинга деятельности российских вузов университет вошел в ТОП-10 эффективных вузов Санкт-Петербурга. В 2015 г. в университете была создана Школа педагогического мастерства, целевой задачей которой было повышение уровня педагогической и квалификации начинающих преподавателей.
Киричек Руслан Валентинович , доктор технических наук, профессор, член Общественной палаты Санкт-Петербурга, президент Федерации гоночных Санкт-Петербурга, Заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга; награжден медалью М. В. Ломоносова «За заслуги в научной деятельности» и орденом им. С.П. Королёва Федерации космонавтики России; отмечен благодарностями Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Губернатора Санкт-Петербурга Беглова А. Д., а также многочисленными благодарностями и почетными грамотами Комитета по науке и высшей школе, Комитета по информатизации и связи Санкт-Петербурга, сектора стандартизации Международного союза электросвязи, Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики	С 2023 г. по настоящее время	Широкое развитие получило взаимодействие университета с Международным союзом электросвязи. Совместно с ПАО «Ростелеком» разработаны международные рекомендации МСЭ-Т и международный стандарт ИСО/МЭК. СПбГУТ принимает участие в федеральной программе «Приоритет-2030» – программе отраслевого лидерства университетов. В университете созданы факультет кибербезопасности и цифровая кафедра, появилось новое направление подготовки бакалавров – «Мехатроника и робототехника». Выполнены разработки киберсистемы пилотирования дронов через российскую геостационарную спутниковую группировку.

95 лет – это только начало. А впереди – новые разработки в области комплексного инжиниринга гибридных сетей связи и перспективных направлений беспилотных авиационных систем, а также робототехники, видеоинформационных систем различного назначения, включая системы дополненной реальности, спутниковых и наземных систем радиосвязи, телевидения и радиовещания, цифровой экономики; участие в региональных и федеральных проектах; подготовка специалистов для самых востребованных сфер цифровой экономики.

Редакция журнала «Труды учебных заведений связи» поздравляет коллектив СПбГУТ с 95-летием со дня основания университета и желает всегда двигаться к новым свершениям на благо нашей Родины.

Главный редактор Р.В. Киричек

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Близнюк М.В., Близнюк В.И., Постарнак А.П., Болбенков А.В., Кибалин А.Ю. Обнаружение признаков аномального поведения трафика на основе методов искусственного интеллекта	9	Bliznyuk M.V., Bliznyuk V.I., Postarnak A.P., Bolbenkov A.V., Kibalin A.Yu. Artificial intelligence-based traffic anomaly detection
Волчихина М.В. Алгоритм формирования адаптивной речеподобной помехи для защиты конфиденциальной речевой информации в офисных помещениях	21	Volchikhina M.V. An algorithm for forming an adaptive speech-like interference to protect confidential speech information in office spaces
Шамин А.А., Колбанев М.О., Черемухин А.Д. Системный подход разработки архитектуры аналитических цифровых платформ	28	Shamin A.A., Kolbanev M.O., Cheremuhin A.D. A systems approach to the architecture design of analytical digital platforms

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Чжан В., Газизов Т.Р. LDPC и полярные коды в 6G: сравнительное исследование и унифицированные фреймворки	42	Zhang W., Gazizov T.R. LDPC and Polar codes in 6G: A comparative study and unified frameworks
Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС	60	Berezkin A.A., Vivchar R.M., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Research of video stream frame delay in UAVs FPV-control information exchange channel of HSTNs space segment
Бойко И.А., Глушанков Е.И., Лялина А.Ж. Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах	74	Boyko I.A., Glushankov E.I., Lyalina A.Zh. Algorithms for adaptive signal processing in geosynchronous orbit satellite systems
Брагин К.И., Норицин И.А., Дроздова В.Г. Имитационная модель для исследования алгоритмов планирования радиоресурсов уровня доступа в сетях мобильной связи	84	Bragin K.I., Noritsin I.A., Drozdova V.G. Simulation model for radio resource scheduling algorithms at MAC layer of mobile networks
Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Головина Е.Ю., Комиссаров А.М., Филатов П.Е. Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях	97	Vinogradova I.L., Sultanov A.H., Golovina E.Yu., Komissarov A.M., Filatov P.E. Fast optical switching: analysis of existing solutions and a new method ensuring signal/packet switching in multi-service networks
Парфенов М.С., Фукалов В.А., Шевченко А.А., Ткачев Д.Ф. Оценка эффективности механизмов случайного и определенного доступа абонентов к широкополосной сети спутниковой связи	119	Parfenov M.S., Fukalov V.A., Shevchenko A.A., Tkachev D.F. Effectiveness evaluation of random and defined subscriber access mechanisms to a broadband satellite communications network
Росляков А.В., Алексахин П.А., Михайлов В.А. Сеть вычислительных мощностей (CPN)	127	Roslyakov A.V., Aleksakhin P.A., Mikhailov V.A. Computing power network (CPN)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

**2.3.1 – Системный анализ,
управление и обработка
информации, статистика**

**2.3.6 – Методы и системы защиты
информации, информационная
безопасность**

Научная статья

УДК 519.872

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-9-20>

EDN:WALXIJ



Обнаружение признаков аномального поведения трафика на основе методов искусственного интеллекта

✉ Михаил Васильевич Близнюк¹, mikebliznyuk200123@gmail.com

✉ Василий Иванович Близнюк², v_bliznyuk@mail.ru

✉ Андрей Петрович Постарнак³ ✉, postarnak.ap@sut.ru

✉ Александр Владичевич Болбенков², bolben@mail.ru

✉ Антон Юрьевич Кибалин², kibalinanton@mail.ru

¹Федеральная службы охраны Российской Федерации в Северо-Западном Федеральном округе, Санкт-Петербург, 191123, Российская Федерация

²Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность: в настоящее время для обнаружения признаков аномального поведения трафика применяется сигнатурный анализ, однако данный метод имеет свои ограничения. Учитывая недостатки сигнатурного анализа, становится ясным, что использование только этого метода может ограничить возможности обнаружения и предотвращения новых и неизвестных аномалий. Рассмотрено внедрение поведенческого анализа в дополнение к сигнатурному, чтобы обеспечить более полную и надежную защиту информационной системы.

Цель исследования: повышение оперативности обнаружения признаков аномального поведения трафика за счет использования методов искусственного интеллекта.

Используемые методы: для решения задачи обнаружения аномального поведения трафика без обучения на основании анализа принято решение о комбинировании алгоритма *k*-ближайших соседей и метода главных компонент.

Результаты: разработаны алгоритм обнаружения сетевых аномалий, программное средство «Обнаружение сетевых аномалий на основе методов искусственного интеллекта», программный стенд.

Новизна исследования заключается в том, что программное средство позволяет вычислять критерии обнаружения аномалий сетевого трафика за период времени меньший, чем у ранее представленных аналогов, и позволяет обнаруживать различные аномалии без предварительного обучения на готовых шаблонах аномалий.

Практическая значимость: полученные в работе результаты могут быть использованы для классификации аномалий сетевого трафика в информационных системах и инфраструктурах.

Ключевые слова: сетевые аномалии, методы искусственного интеллекта, поведенческий анализ

Ссылка для цитирования: Близнюк М.В., Близнюк В.И., Постарнак А.П., Болбенков А.В., Кибалин А.Ю. Обнаружение признаков аномального поведения трафика на основе методов искусственного интеллекта // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 9–20. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-9-20. EDN:WALXIJ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-9-20>

EDN:WALXIJ

Artificial Intelligence-Based Traffic Anomaly Detection

✉ Mikhail V. Bliznyuk¹, mikebliznyuk200123@gmail.com

✉ Vasiliy I. Bliznyuk², v_bliznyuk@mail.ru

✉ Andrey P. Postarnak³✉, postarnak.ap@sut.ru

✉ Alexandr V. Bolbenkov², bolben@mail.ru

✉ Anton Yu. Kibalin², kibalinanton@mail.ru

¹Federal Security Service of the Russian Federation in the North-Western Federal District, St. Petersburg, 191123, Russian Federation

²Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation

³The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevant. Nowadays to detect signs of abnormal traffic behavior signature analysis is used, but this method has its limitations. Given the disadvantages of signature analysis, it becomes clear that using this method alone can limit the ability to detect and prevent new and unknown anomalies. Considered implementation of a custom analysis in addition to the signature to provide a more complete and reliable information system protection.

The aim of the study is to increase the efficiency of detecting signs of abnormal traffic behavior through the use of artificial intelligence methods.

In result the following were developed: an algorithm for detecting network anomalies, a software tool "Detection of network anomalies based on methods of artificial intelligence", a software stand.

The novelty of the study lies in the fact that the software allows you to calculate the criteria for detecting anomalies of network traffic in a period of time shorter than that of previously presented analogs and allows you to detect various anomalies without prior training on ready-made anomaly templates.

The practical significance. The results obtained in the work can be used for classification of anomalies of network traffic in information systems and infrastructures.

Keywords: network anomalies, artificial intelligence methods, behavioral analysis

For citation: Bliznyuk M.V., Bliznyuk V.I., Postarnak A.P., Bolbenkov A.V., Kibalin A.Yu. Artificial Intelligence-Based Traffic Anomaly Detection. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):9–20. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-9-20. EDN:WALXIJ

Введение

Современные информационные системы и коммуникационные инфраструктуры сталкиваются с растущими угрозами, что требует эффективных методов их обнаружения и предотвращения [1–3]. В условиях стремительного роста числа угроз традиционные способы защиты часто оказываются недостаточными. Одним из таких методов является сигнатурный анализ, который основан на поиске известных шаблонов аномалий в сетевом трафике [3, 4]. Сигнатурный анализ работает путем сравнения

входящего трафика с базой данных известных сигнатур, представляющих собой цифровые «отпечатки» ранее идентифицированных угроз [5]. Этот метод позволяет быстро и эффективно обнаруживать аномалии, которые уже зарегистрированы и классифицированы в банке данных угроз безопасности информации [6].

Однако сигнатурный анализ имеет значительные ограничения [7]. Во-первых, он не способен выявлять новые, ранее неизвестные угрозы. Появление новых видов угроз требует обновления базы

сигнатур, что создает временные промежутки, в течение которых системы остаются уязвимыми. Во-вторых, этот метод плохо справляется с полиморфными угрозами, которые могут изменять свои сигнатуры с целью обхода системы защиты. В-третьих, сигнатурный анализ часто требует значительных ресурсов для поддержания и обновления базы данных, что может быть проблематично для больших и динамичных сетей.

В данной статье рассматривается альтернатива и дополнение к сигнатурному анализу – поведенческий анализ. Он основан на мониторинге и изучении нормального поведения системы и выявление отклонений от этого поведения, которые могут свидетельствовать о наличии аномалий [8]. Этот подход позволяет обнаруживать подозрительную активность, даже если конкретная аномалия ранее не была зарегистрирована. Поведенческий анализ оценивает различные параметры, такие как объем трафика, типы запросов, временные метки и другие метрики, чтобы определить аномалии.

Одним из ключевых преимуществ поведенческого анализа является его способность функционировать без предварительного обучения. В то время, как многие современные системы обнаружения аномалий требуют предварительного обучения на больших объемах данных для создания моделей нормального поведения, поведенческий анализ может адаптироваться к новым и неизвестным угрозам в реальном времени (<https://bdu.fstec.ru/threat>). Это достигается за счет использования адаптивных алгоритмов, которые могут автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия и идентифицировать аномалии на основе текущих наблюдений.

Таким образом, поведенческий анализ может значительно улучшить обнаружение новых аномалий, дополняя сигнатурный анализ и обеспечивая более высокий уровень защиты информационных систем. В условиях постоянного появления новых угроз и усложнения действий нарушителя, комбинированное использование сигнатурного и поведенческого анализов представляется наиболее эффективным подходом для обеспечения комплексной защиты информационных систем и коммуникационных инфраструктур.

Анализ методов искусственного интеллекта

Анализ методов искусственного интеллекта включает в себя рассмотрение различных подходов и техник, используемых для создания систем, способных имитировать интеллектуальные способности человека.

Вот несколько основных методов искусственного интеллекта:

1) глубокое обучение (*от англ. Deep Learning*);

2) эволюционные алгоритмы (*от англ. Evolutionary Algorithms*);

3) логическое программирование (*от англ. Logic Programming*);

4) символьные методы (*Symbolic AI*);

5) обработка естественного языка (*NLP, аббр. от англ. Natural Language Processing*);

6) обучение с подкреплением (*от англ. Reinforcement Learning*);

7) системы экспертных знаний (*от англ. Expert Systems*);

8) машинное обучение (*от англ. Machine Learning*).

Глубокое обучение – подраздел машинного обучения, использующий искусственные нейронные сети с большим числом слоев для извлечения сложных закономерностей из данных. Глубокое обучение получило широкое распространение благодаря своей способности эффективно обрабатывать большие объемы данных и решать сложные задачи, такие как распознавание образов, естественный язык, аудиообработка и другие.

Ключевые аспекты глубокого обучения:

– искусственные нейронные сети (*ANN, аббр. от англ. Artificial Neural Networks*): основной строительный блок глубокого обучения; ANN моделируют структуру нейронной сети мозга и состоят из множества взаимосвязанных узлов, называемых нейронами; каждый нейрон принимает входные данные, выполняет вычисления и передает результаты следующему слою;

– глубокие нейронные сети (*DNN, аббр. от англ. Deep Neural Networks*) содержат несколько скрытых слоев между входными и выходными слоями; глубокие сети способны автоматически извлекать иерархии признаков из данных на различных уровнях абстракции;

– сверточные нейронные сети (*CNN, аббр. от англ. Convolutional Neural Networks*) предназначены для обработки структурированных данных, таких как изображения; CNN имеют специальные слои свертки и пулинга, которые позволяют им извлекать пространственные закономерности изображений;

– рекуррентные нейронные сети (*RNN, аббр. от англ. Recurrent Neural Networks*) обрабатывают последовательные данные, сохраняя состояние или память о предыдущих входах; RNN широко используются в задачах обработки естественного языка, временных рядах и других последовательностях данных;

– генеративные модели (*от англ. Generative Models*) позволяют создавать новые данные, имитируя распределение обучающих данных; примеры включают в себя генеративные состязательные

сети (GAN, *аббр. от англ. Generative Adversarial Networks*) и вариационные автокодировщики (VAE, *аббр. от англ. Variational Autoencoders*).

К преимуществам глубокого обучения можно отнести *автоматическое извлечение признаков* (глубокие модели способны автоматически извлекать иерархии признаков из данных, что устраняет необходимость вручную создавать признаки); *способность к обобщению* (могут обучаться на больших объемах данных и обобщать на новые данные, что делает их эффективными в различных прикладных областях); *масштабируемость* (с развитием вычислительных мощностей и технологий глубокое обучение может масштабироваться для обработки больших объемов данных).

Глубокое обучение находит применение во многих областях, включая компьютерное зрение, распознавание речи, естественный язык, аудиообработку, медицинскую диагностику, финансовый анализ и другие. Его возможности и эффективность продолжают расти с развитием технологий и улучшением алгоритмов.

Эволюционные алгоритмы основаны на принципах естественного отбора и эволюции, где популяция решений подвергается итеративному процессу мутации, скрещивания и отбора для достижения оптимальных или приблизительно оптимальных решений. Это класс алгоритмов оптимизации, вдохновленных механизмами естественного отбора и эволюции в природе. Они используют метафору процессов эволюции, таких как мутация, скрещивание и отбор, для выявления оптимальных решений в пространстве поиска.

Основные компоненты и принципы работы алгоритмов:

- эволюционные алгоритмы работают с *популяцией* потенциальных решений, называемых индивидами или особями; эти особи представляют собой кандидатов на оптимальное решение задачи оптимизации;

- для оценки качества каждой особи используется *функция приспособленности* (*от англ. Fitness Function*), которая определяет, насколько хорошо каждая особь решает задачу оптимизации; в зависимости от постановки задачи значение функции приспособленности максимизируется или минимизируется;

- *генетические операторы*: мутация, *от англ. Mutation* (процесс случайного изменения генетического материала особи для создания новых вариантов); скрещивание, *от англ. Crossover* (процесс комбинирования генетического материала двух особей для создания потомства, которое обладает комбинацией их характеристик); отбор, *от англ. Selection* (процесс выбора особей для создания следующего поколения на основе их приспособленно-

сти; чем лучше приспособленность, тем больше вероятность, что эта особь будет выбрана для скрещивания и / или передачи генетического материала следующему поколению);

- *процесс эволюции*: итеративно применяются генетические операторы к текущей популяции особей, чтобы создать новое поколение; этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие остановки – достижение максимального числа поколений или достижение определенного уровня приспособленности;

- существует несколько *параметров алгоритма*, которые могут влиять на эффективность поиска решений, такие как размер популяции, вероятность мутации и скрещивания, способы отбора и т. д.; настройка этих параметров может потребоваться для достижения оптимальных результатов.

Эволюционные алгоритмы могут применяться к широкому спектру задач оптимизации, включая поиск функций, обучение нейронных сетей, проектирование архитектуры систем и другие. Они часто используются в случаях, когда функция приспособленности не дифференцируема или, когда пространство поиска слишком велико для эффективного применения классических методов оптимизации.

Логическое программирование – подход к искусственному интеллекту, где знания и правила представлены в форме логических выражений. Примером такого языка является Prolog (*от англ. Programming in Logic*), который широко используется в академических и научных сферах, а также в различных прикладных областях. Это парадигма программирования, основанная на математической и формальной логике. Основным инструментом здесь является логический язык программирования, а также система вывода на основе логических правил и фактов. Этот метод широко используется в экспертных системах. В Prolog программа состоит из фактов и правил, а система вывода использует механизм унификации и резолюции для поиска ответов на запросы.

Основные элементы логического программирования: *факты* (утверждения о мире, которые истинны по определению; факты представляются в виде предикатов, которые описывают отношения между объектами); *правила* (логические выражения, которые определяют отношения между фактами; правила состоят из головы и тела: голова содержит цель (запрос), а тело – условия, при которых цель считается истинной); *запросы* (выражения, для которых система вывода пытается найти ответы, используя имеющиеся факты и правила; запросы представляют собой цели, которые нужно достигнуть); *унификация* (процесс сопоставления переменных и термов для нахождения значений переменных, при которых выражение становится

истинным; широко используется в системах вывода логического программирования для сопоставления запросов с фактами и правилами).

Логическое программирование хорошо подходит для решения задач, в которых знания о предметной области легко выражаются в виде логических правил и фактов. Оно часто используется в областях искусственного интеллекта, а также в экспертных системах, обработке естественного языка, анализе данных и других прикладных областях, где важна логическая инференция и обработка знаний.

Символьные методы, также известные как символьный искусственный интеллект (Symbolic AI), – подход к созданию интеллектуальных систем, который сосредоточен на символах и символьных операциях и использует символьные представления знаний и операции для решения задач, в отличие от статистических методов, таких как машинное обучение и нейронные сети.

Основные характеристики символьного искусственного интеллекта:

- *символьное представление знаний* (знания о мире представляются в виде символов и символьных выражений; эти символы могут представлять объекты, отношения, действия и другие элементы предметной области);

- *манипуляция символами* (сопоставление шаблонов, унификация, модификация символьных выражений и выполнение символьных операций, таких как логические выводы).

Символьные методы часто используют *логические выводы* для генерации новых знаний на основе имеющихся фактов и правил. Логический вывод позволяет извлекать новые знания и делать заключения на основе логических правил. Примером символьного искусственного интеллекта являются *экспертные системы*, использующие символьное представление знаний и логический вывод для моделирования экспертных знаний и принятия решений в специфической предметной области.

Для реализации методов часто используют специализированные символьные языки программирования, такие как Lisp, Prolog и другие. Эти языки обеспечивают удобные средства для работы с символами и выполнения символьных операций.

Преимущества символьного искусственного интеллекта включают ясность и интерпретируемость решений, возможность использования экспертных знаний и эффективность в задачах, где символьное представление знаний является естественным и удобным. В то же время возможны ограничения в областях, где данные сложны или неточны, и где требуется обучение на больших объемах данных. В последние десятилетия символьные методы часто комбинируются с методами машинного обучения и

другими подходами для создания гибридных систем искусственного интеллекта, которые объединяют преимущества различных методов.

Обработка естественного языка – область искусственного интеллекта, занимающаяся взаимодействием между компьютерами и естественными языками, используемыми людьми для коммуникации. Она включает в себя такие задачи, как распознавание речи, синтаксический анализ, семантический анализ, машинный перевод и другие. В основе этого метода положена цель – разработать методы и системы, которые могут понимать, анализировать и генерировать текст на естественных языках, таких как английский, русский, китайский и другие.

Ключевые аспекты метода:

- *токенизация и сегментация* (процесс разделения текста на более мелкие элементы, такие как слова, фразы или предложения; включает в себя разделение текста на отдельные слова или токены, а сегментация отвечает за разделение текста на более крупные единицы, такие как предложения или абзацы);

- *морфологический анализ* (процесс анализа формы слова, который включает в себя определение частей речи, склонения, спряжения и других морфологических характеристик; помогает понять структуру и смысл слова в контексте предложения);

- *синтаксический анализ* (процесс определения структуры предложения и отношений между его элементами, такими как подлежащее, сказуемое, дополнение и т. д.; помогает понять синтаксическую структуру предложения и его семантический смысл);

- *семантический анализ* (это процесс понимания смысла текста и выявления семантических отношений между словами и фразами; включает в себя определение значения слов и конструкций, а также их взаимосвязей в контексте);

- *обработка диалогов* (понимание и генерация диалогов между компьютером и пользователем; включает в себя распознавание речи, понимание интенгов пользователя, генерацию ответов и поддержку естественного и интуитивного взаимодействия);

- *машинный перевод* (автоматический перевод текста с одного языка на другой; используются различные модели и методы, включая статистические подходы, нейронные сети и трансформеры, для перевода текста между языками);

- *извлечение информации и анализ текстовых данных* (извлечение структурированной информации из неструктурированных текстовых данных; может включать извлечение сущностей, связей, фактов, событий и другой информации из текста).

Обработка естественного языка находит применение во многих областях, включая поиск информации, анализ социальных медиа, автоматическую обработку документов, управление знаниями, медицинское информационное моделирование, автоматизацию процессов обслуживания клиентов и многое другое. В последние годы развитие нейронных сетей и глубокого обучения привело к значительному прогрессу в области обработки естественного языка, позволяя решать более сложные задачи с большей точностью и эффективностью.

Обучение с подкреплением – метод машинного обучения, в котором агент (программа или робот) учится принимать последовательность действий в среде с целью максимизации суммарного награждения. Агент действует в среде, где он может выполнять различные действия, наблюдать состояние среды и получать награды или штрафы в зависимости от своих действий. Цель агента состоит в том, чтобы научиться принимать оптимальные действия, которые приведут к максимизации награды в долгосрочной перспективе.

Основными компонентами метода являются среда (*от англ. Environment*), состояние (*от англ. State*), функция вознаграждения (*от англ. Reward Function*), политика (*от англ. Policy*), обучение (*от англ. Learning*).

Среда – контекст, в котором действует агент. Среда может быть реальной (например, физический робот) или виртуальной (например, симуляция игрового мира). Обычно она характеризуется состояниями, действиями, возможными наградами и правилами, определяющими, какие действия возможны в каждом состоянии.

Состояние – описание текущего положения агента в среде. Состояние может быть полным, когда оно содержит всю информацию о среде, или частичным, когда агент видит только часть информации.

Действие – выбор, который агент делает в определенном состоянии с целью изменения этого состояния и получения награды. Действия могут быть дискретными (например, направление движения) или непрерывными (например, сила двигателя).

Функция вознаграждения определяет размер вознаграждения, которое агент получает за выполнение конкретного действия в определенном состоянии. Цель агента состоит в том, чтобы максимизировать суммарное награждение в течение времени.

Политика – стратегия, которую агент использует для выбора действий в каждом состоянии. Политика может быть детерминированной (определенной) или стохастической (вероятностной), и ее цель состоит в том, чтобы максимизировать суммарное награждение.

Агент использует методы *обучения* для настройки своей стратегии на основе опыта взаимодействия со средой. Обучение может происходить путем проб и ошибок (*Trial and Error*), используя различные методы, такие как *Q-обучение*, методы глубокого обучения и многое другое.

Применения метода обучения с подкреплением включают в себя управление роботами, автономное вождение, управление игровыми персонажами, оптимизацию финансовых портфелей, управление энергосистемами и другие. Метод представляет собой мощный инструмент для решения задач, где требуется принятие последовательности действий для достижения определенных целей в динамической среде.

Системы экспертных знаний моделируют решение проблем в определенной области, основываясь на знаниях экспертов в этой области. Эти системы принимают данные о проблеме, анализируют их с помощью правил и знаний, заложенных в систему, и предоставляют пользователю рекомендации, советы или решения на основе своего «экспертного» знания.

Ключевые аспекты систем экспертных знаний:

- *база знаний* (*Knowledge Base*) – центральная часть системы, которая содержит знания и правила, определяющие специализированные знания эксперта в определенной области; знания обычно представлены в виде правил «если – то», «то» (*Rule-Based*) или в виде фактов и предикатов (*Declarative Knowledge*);

- *механизм вывода* (*Inference Engine*) – компонент системы, который использует базу знаний для решения конкретных проблем; применяет логические правила и алгоритмы, чтобы сформулировать заключения и принять решения на основе предоставленных данных;

- *интерфейс пользователя* (интерактивная часть системы) позволяет пользователям взаимодействовать с системой; может принимать данные от пользователя, задавать вопросы для уточнения информации и предоставлять рекомендации или выводы;

- *обучение и адаптация* (некоторые системы экспертных знаний могут включать в себя возможность обучения на основе опыта или данных, что позволяет им улучшать свою производительность и адаптироваться к изменяющимся условиям).

Применение систем экспертных знаний включает в себя широкий спектр областей, в том числе медицину, финансы, инженерные системы, управление предприятием и многое другое. Например, системы поддержки принятия решений в медицине могут использоваться для диагностики заболеваний и предоставления рекомендаций по лечению на основе клинических данных пациента и медицинских знаний.

Однако следует отметить, что эти системы имеют свои ограничения. Их применение неэффективно в областях, где знания не могут быть формализованы или изменяются слишком быстро, а также в задачах, требующих контекстного понимания или нестандартных решений. В последние годы системы экспертных знаний часто комбинируются с другими методами искусственного интеллекта, такими как машинное обучение и обработка естественного языка, чтобы создавать более гибкие и мощные системы поддержки принятия решений.

Машинное обучение позволяет компьютерным системам обучаться на основе данных и опыта, вместо явного программирования. Методы машинного обучения включают в себя такие алгоритмы как нейронные сети, деревья решений, метод опорных векторов, кластеризация и другие.

Методы искусственного интеллекта, в частности машинного обучения, в последние годы стремительно развиваются и находят применение в самых различных областях от медицины и финансов до транспорта и развлечений [9]. Машинное обучение, являясь одной из ключевых технологий искусственного интеллекта, позволяет системам самостоятельно учиться и адаптироваться на основе данных, что значительно повышает их эффективность и точность. Это делает машинное обучение незаменимым инструментом в современном мире, где количество информации растет экспоненциально, а задачи становятся все более сложными [10].

Основная цель машинного обучения – разработка алгоритмов, которые могут автоматически обнаруживать закономерности в данных и исполь-

зовать их для принятия решений или предсказаний. Машинное обучение включает такие методы, как контролируемое и неконтролируемое обучение, обучение с подкреплением и другие. Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и ограничения, что делает их применение специфичным для различных типов задач и данных.

Анализ существующих методов машинного обучения для решения задачи обнаружения сетевых аномалий представлен в таблице 1. На основании проведенного анализа сделан вывод, что ни один из алгоритмов не может быть применен для выполнения задачи без предварительного обучения. Для решения задачи обнаружения аномального поведения трафика без предварительного обучения выдвигается гипотеза о комбинировании алгоритма *k*-ближайших соседей (KNN, *аббр.* от *англ.* *k*-Nearest Neighbors) и метода главных компонент (PCA, *аббр.* от *англ.* *Principal Component Analysis*). Алгоритм KNN выбран из-за его простоты реализации и высокой точности обнаружения аномалий¹. Метод PCA основан на многомерном анализе данных и используется для уменьшения размерности данных. PCA находит новые оси (главные компоненты), по которым данные имеют наибольшую дисперсию. Затем данные проецируются на эти главные компоненты, что позволяет сократить количество признаков, сохраняя при этом наибольшую часть их вариации. Это решение легло в основу разработанного алгоритма.

¹Государственная регистрация программы для ЭВМ «Anomaly Analyzer» (Роспатент). 2023 г.

ТАБЛИЦА 1. Анализ методов машинного обучения

TABLE 1. Analysis of Machine Learning Methods

Критерий	Деревья решений	Метод опорных векторов (SVM)	<i>k</i> -ближайших соседей	Случайный лес	<i>k</i> -ближайших соседей с методом главных компонент
Применимость	Широкая	Широкая	Ограниченная	Широкая	Ограниченная
Сложность обучения	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Низкая
Прозрачность	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая	Средняя
Требования к данным	Низкие	Высокие	Высокие	Низкие	Высокие
Интерпретируемость	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая	Средняя
Вычислительная сложность	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
Возможность работы без обучения	Не возможна	Не возможна	Не возможна	Не возможна	Возможна

Способ обнаружения аномального поведения трафика на основе методов искусственного интеллекта

Исходными данными для функционирования предлагаемого способа является база данных трафика с параметрами различных уровней. В основе способа обнаружения аномального поведения трафика на основе методов искусственного интеллекта лежит применение двух методов: РСА и метод k -средних. Метод РСА применяется для предобработки данных для последующего применения метода k -средних. Для обработки данных перед применением метода РСА, в основе которого лежит процесс приведения данных к стандартному нормальному распределению с нулевым средним и единичной дисперсией. Это делается с помощью вычитания среднего значения и деления на стандартное отклонение для каждой функции (признака).

Для каждого признака вычисляются среднее значение (*от англ.* Mean) и стандартное отклонение (*от англ.* Standard Deviation) по всему набору данных. Преобразование данных производится с помощью вычитания среднего значения (для каждого признака), после чего полученный результат делится на стандартное отклонение. Это преобразование называется центрированием и масштабированием.

Формула для стандартизации данных выглядит следующим образом:

$$x_{std} = \frac{x - mean(x)}{std(x)}, \quad (1)$$

где x_{std} – стандартизированное значение признака x ; $mean(x)$ – среднее значение признака x ; $std(x)$ – стандартное отклонение признака x .

Результаты стандартизации: после преобразования все признаки имеют среднее значение, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице. Таким образом, данные приводятся к стандартному нормальному распределению.

Полученные в результате этапа «стандартизации» данные применяются на следующем этапе в методе главных компонент. Метод РСА является методом линейного преобразования, который используется для снижения размерности данных. Он позволяет выделить наиболее значимые признаки данных путем проецирования их на новое пространство признаков.

Пусть у нас имеется набор данных X размерности $m \times n$, где m – количество наблюдений, а n – количество признаков. Задача состоит в том, чтобы найти новые оси (главные компоненты), по которым данные будут наиболее широко распределены. Для ускорения работы метода стандартизация была проведена заранее.

После стандартизации данных мы вычисляем ковариационную матрицу Σ , которая показывает связь между всеми парами признаков:

$$\sum \frac{1}{n-1} ((X - \mu)^T \cdot (X - \mu)), \quad (2)$$

где X – матрица данных размерности $m \times n$; μ – вектор средних значений признаков.

Далее мы находим собственные векторы v_i и собственные значения λ_i ковариационной матрицы Σ :

$$\sum v_i = \lambda_i v_i, \quad (3)$$

где v_i – собственный вектор; λ_i – собственное значение.

Главные компоненты выбираются в порядке убывания их соответствующих собственных значений. Таким образом, первая главная компонента соответствует собственному вектору с наибольшим собственным значением, вторая – собственному вектору со вторым по величине собственным значением, и так далее.

На следующем шаге проецируем исходные данные на новое пространство признаков, образованное главными компонентами. Это делается путем умножения исходных данных X на матрицу главных компонент V :

$$X_{pca} = X \cdot V, \quad (4)$$

где X_{pca} – данные в новом пространстве признаков; V – матрица главных компонент, содержащая собственные векторы как столбцы.

Совокупность этих вычислений вместе составляют процесс РСА, который позволяет снизить размерность данных, сохраняя при этом наибольшее количество информации.

После выполнения метода главных компонент применяем метод KNN. Для этого рассчитываем Евклидово расстояние. В алгоритме обнаружения аномалий оно используется для измерения разницы между каждым наблюдением и средним значением всех наблюдений. Это помогает определить, насколько далеко каждое наблюдение находится от среднего значения данных.

Евклидово расстояние является мерой расстояния между двумя точками $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ и $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ в многомерном пространстве и определяется следующим образом:

$$d(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}, \quad (5)$$

где $d(P, Q)$ – евклидово расстояние между точками P и Q ; p_i и q_i – координаты точек P и Q по i -й оси, соответственно.

В контексте обнаружения аномалий евклидово расстояние используется для вычисления расстояния от каждой точки данных до их среднего значения. Это позволяет определить, насколько каждая точка данных отличается от общего среднего значения данных.

Для каждой точки данных X_i Евклидово расстояние вычисляется относительно среднего значения μ по следующей формуле:

$$d(X_i, \mu) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \mu_j)^2}, \quad (6)$$

где X_{ij} – значение i -й точки данных по j -му признаку; μ_j – среднее значение j -го признака по всем точкам данных.

Этот процесс позволяет нам вычислить расстояние от каждой точки данных до их центра (среднего значения) и использовать это расстояние в дальнейшем для определения аномалий.

После расчета Евклидова расстояния устанавливаем пороговое значение. Пороговое значение определяется как среднее расстояние плюс несколько стандартных отклонений. Обычно используется несколько стандартных отклонений от среднего значения для определения диапазона, в пределах которого большинство наблюдений считается нормальными, и точки данных за пределами этого диапазона считаются аномалиями.

Пороговое значение вычисляется по формуле:

$$\text{Пороговое значение} = \text{Среднее значение} + k \times \text{Стандартное отклонение}, \quad (7)$$

где Среднее расстояние – среднее значение всех расстояний между точками данных и их центром; k – коэффициент, который определяет, насколько далеко от среднего значения лежат аномальные точки данных (чем больше значение k , тем более строгим будет критерий для определения аномалий); Стандартное отклонение – мера разброса точек данных относительно их среднего значения.

Чаще всего используется $k = 3$; это означает, что пороговое значение равно среднему расстоянию плюс три стандартных отклонения. Это пороговое значение затем используется для определения того, какие точки данных считаются аномалиями: если расстояние от точки данных до среднего превышает пороговое значение, то точка считается аномалией.

Алгоритм обнаружения сетевых аномалий на основе методов искусственного интеллекта

На рисунке 1 представлен разработанный алгоритм для обнаружения аномалий в информационных системах и коммутационных инфраструктурах.

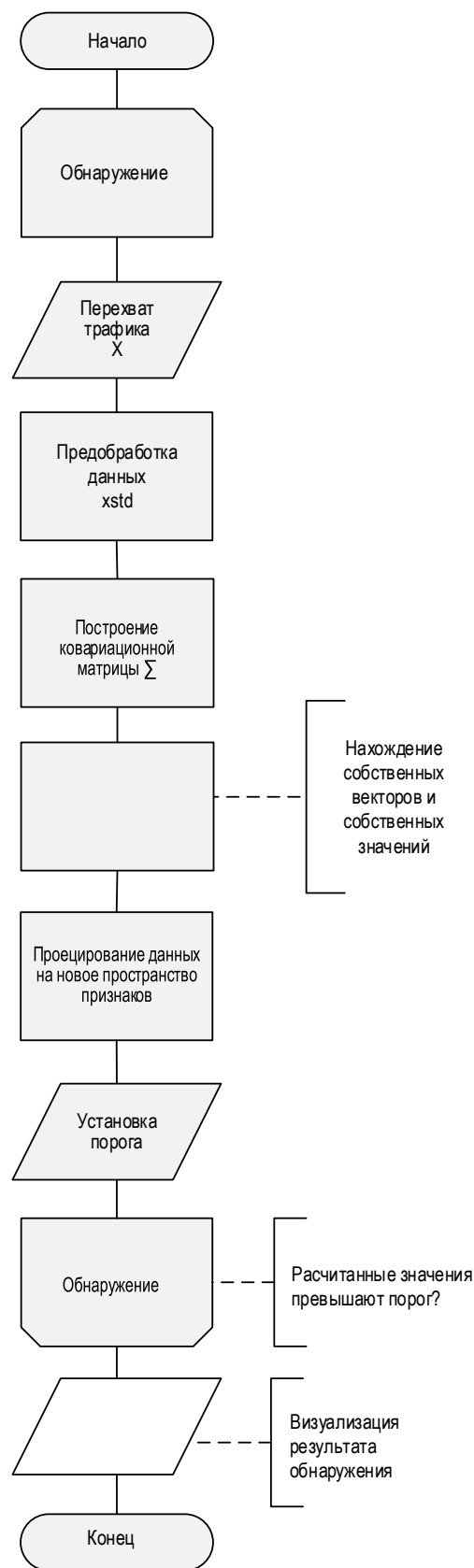


Рис. 1. Алгоритм обнаружения аномалий сетевого трафика

Fig. 1. Network Traffic Anomaly Detection Algorithm

Разработанный алгоритм предназначен для обнаружения признаков аномального поведения трафика в информационных системах и коммутационных инфраструктурах, состоящей из телекоммуникационного оборудования, автоматизированного рабочего места (АРМ) пользователя, системы мониторинга сетевого трафика, развернутой на АРМ администратора.

Процесс перехвата трафика происходит в заданных интервалах времени с выводом отчета в случаях обнаружения аномалий. Процесс поиска аномалий является непрерывным и прекращается в случае остановки работы программного средства обнаружения аномалий. Поиск аномалий основан на методе KNN. Предварительно производится предобработка входных данных, получаемых с помощью протокола Netflow, методом PCA. Такой подход позволил с высокой точностью обнаруживать различные аномалии в сети.

Так как аномалия является подозрением на событие безопасности в сети, следующим этапом яв-

ляется описание каждой аномалии с занесением данного факта в специальный журнал событий. Разработанный алгоритм способен лишь выявить сам факт появления аномалии, но не обладает расширенными механизмами для анализа и полноценной системой принятия решений, которое определяет событие как событие безопасности. Поэтому данные об аномалии необходимо передать на анализ в SIEM-систему.

Результаты эксперимента

Результат верификации предложенного способа обнаружения аномалий сетевого трафика представлены на рисунках 2 и 3. Верификация основана на исследовании трафика из выборки известных аномалий, которая подвергается анализу согласно разработанному алгоритму. Работа алгоритма начинается с нормализации и уменьшения размера данных на основе PCA, результаты которого представлены на рисунке 2.

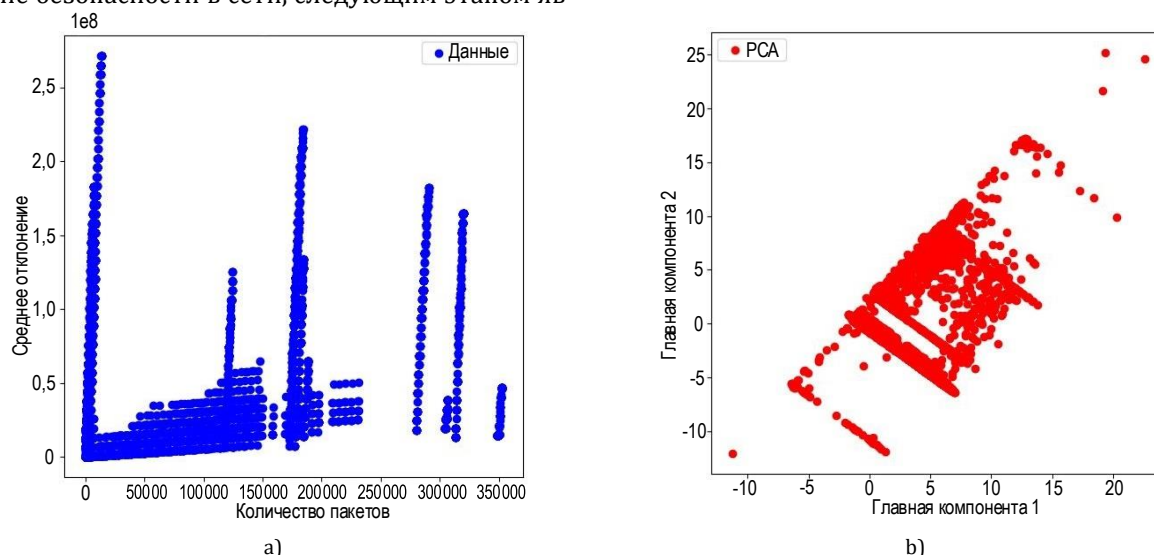


Рис. 2. Графики обнаружения аномалий до (а) и после (б) обработки методом PCA

Fig. 2. Anomaly Detection Plots before (a) and after (b) PCA Treatment

Далее начинается поиск аномалий на основе метода KNN. Автоматически устанавливается пороговое значение, все что его превышает определяется как аномалия. Индексы аномальных наблюдений фиксируются.

Для оценки эффективности методики был проведен натурный эксперимент. Заранее была подготовлена база данных перехваченного трафика с различными сетевыми аномалиями. Эксперимент проводился на двух программных средствах: Anomaly Analyzer [11] и Обнаружение сетевых аномалий на основе методов искусственного интеллекта (разработанное программное средство).

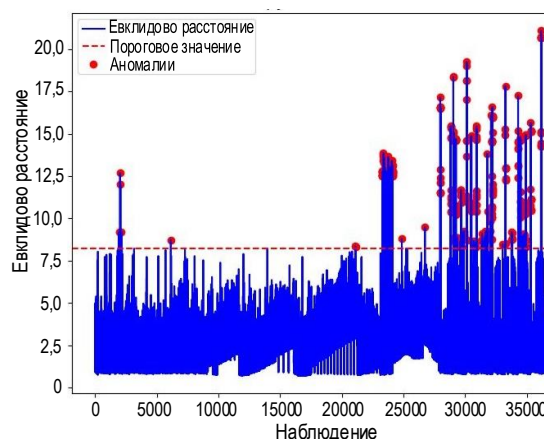


Рис. 3. Обнаружение аномалий

Fig. 3. Anomaly Detection

В ходе эксперимента выявлено (рисунок 4):

- время работы программного средства уменьшилось с 4,3 до 2,4 сек;
- количество ложноположительных срабатываний увеличилось с 252 до 464;
- количество ложноотрицательных срабатываний уменьшилось с 352 до 0.

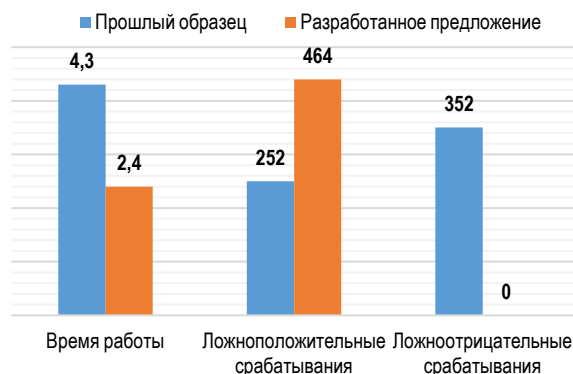


Рис. 4. Оценка эффективности методики обнаружения аномалий сетевого трафика

Fig. 4. Evaluation of the Effectiveness of the Detection Method Network Traffic Anomalies

Данные эксперимента (см. рисунок 4) показали повышение оперативности решения задачи обнаружения аномалий сетевого трафика при использовании разработанной методики: время работы программы снизилось на 1,9 сек.

Введем коэффициент повышения оперативности, равный отношению времени работы разработанного программного средства ко времени работы прошлого образца:

$$\text{КПО} = \frac{2,4 \cdot 100}{4,3} = 55,8 \, \%.$$

Список источников

1. Dainotti A., Benson K., King A., Claffy K.C., Kallitsis M., Glatz E., et al. Estimating Internet Address Space Usage Through Passive Measurements // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2011. Vol. 41. Iss. 2. PP. 30–37. DOI:10.1145/2567561.2567568
2. Lazarevic A., Kumar V. Feature Bagging for Outlier Detection // Proceedings of the Eleventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining (KDD '05, Chicago, USA, 21–24 August 2005). New York: Association for Computing Machinery, 2005. PP. 157–166. DOI:10.1145/1081870.1081891
3. Talukder M.A., Islam M.M., Uddin M.A., Hasan K.F., Sharmin S., Alyami S.A. Machine learning-based network intrusion detection for big and imbalanced data using oversampling, stacking feature embedding and feature extraction // Journal of Big Data. 2024. Vol. 11. P. 11. DOI:10.1186/s40537-024-00886-w
4. Шабуров А.С., Никитин А.С. Модель обнаружения компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 29. С. 104–117. EDN:ZBKJTN
5. Бугорский М.А., Каплин М.А., Остроцкий С.В., Казакова О.В., Селин В.И. Особенности использования объектов критической информационной инфраструктуры с современной системой обнаружения вторжений // Sciences of Europe. 2021. № 66-1(66). С. 42–46. EDN: SXGMHB. DOI:10.24412/3162-2364-2021-66-1-42-46
6. Семенов В.В., Арустамов С.А. Выявление рисков нарушений информационной безопасности киберфизических систем на основе анализа цифровых сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 770–772. DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-5-770-772. EDN: BHITPY
7. Mirkovic J., Prier G., Reiher P. Attacking DDoS at the Source // Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Network Protocols (Paris, France, 12–15 November 2002). IEEE, 2002. PP. 312–321. DOI:10.1109/ICNP.2002.1181418
8. Ahmed M., Mahmood A.N., Hu J. A survey of network anomaly detection techniques // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. PP. 19–31. DOI:10.1016/j.jnca.2015.11.016

Вероятность ложноположительных срабатываний можно определить как отношение ложноположительных срабатываний к общему числу срабатываний:

$$P_{\text{лс}} = \frac{464 \cdot 100}{956} = 48,5 \, \%.$$

Вероятность ложноотрицательных срабатываний вычисляется как отношение ложноотрицательных срабатываний к общему числу срабатываний. В ходе эксперимента выявлено, что ложноотрицательные срабатывания отсутствуют, следовательно, их вероятность равна 0.

Таким образом, натурный эксперимент показал, что выдвинутая гипотеза подтверждается.

Заключение

В статье предложен способ обнаружения сетевых аномалий на информационных системах и коммутационных инфраструктурах на основе методов искусственного интеллекта. Разработан алгоритм и программное средство обнаружения сетевых аномалий. Данный способ позволяет повысить оперативность обнаружения сетевых аномалий, а также позволяет обнаруживать новые аномалии, которые не подлежат обнаружению методами сигнатурного анализа, при задействовании меньшего количества пакетов.

Дальнейшим направлением развития исследования является применение методов искусственного интеллекта для классификации аномалий сетевого трафика. Нейронная сеть позволит эффективнее решать задачу обнаружения и классификации сетевых аномалий.

9. Alali A., Yousef M. A Survey on Intrusion Detection Systems (IDS) Using Machine Learning Algorithms // Journal of Xi'an Shiyu University. 2022. Vol. 18. Iss. 6. PP. 183–197.
10. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey // ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41. Iss. 3. PP. 1–58. DOI:10.1145/1541880.1541882. EDN:MYREHF
11. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. Science. 2015. Vol. 349. Iss. 6245. PP. 255–260. DOI:10.1126/science.aaa8415

References

1. Dainotti A., Benson K., King A., Claffy K.C., Kallitsis M., Glatz E., et al. Estimating Internet Address Space Usage Through Passive Measurements. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2011;41(2):30–37. DOI:10.1145/2567561.2567568
2. Lazarevic A., Kumar V. Feature Bagging for Outlier Detection. *Proceedings of the Eleventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining, KDD '05, 21–24 August 2005, Chicago, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2005. p.157–166. DOI:10.1145/1081870.1081891
3. Talukder M.A., Islam M.M., Uddin M.A., Hasan K.F., Sharmin S., Alyami S.A. Machine learning-based network intrusion detection for big and imbalanced data using oversampling, stacking feature embedding and feature extraction. *Journal of Big Data*. 2024;11:11. DOI:10.1186/s40537-024-00886-w
4. Shaburov A.S., Nikitin A.S. The model for detecting computer attacks on objects of critical information infrastructure. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems*. 2019;29:104–117. (in Russ.) EDN:ZBKJTN
5. Bugorsky M., Kaplin M., Ostrotsky S., Kazakova O., Selin V. Features of using critical information infrastructure facilities with a modern intrusion detection system. *Sciences of Europe*. 2021;66-1(66):42–46. (in Russ.) DOI:10.24412/3162-2364-2021-66-1-42-46. EDN: SXGMHB
6. Semenov V.V., Arustamov S.A. Risk identification of security information violations in cyber-physical systems based on analysis of digital signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;20(5):770–772. (in Russ.) DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-5-770-772. EDN: BHITPY
7. Mirkovic J., Prier G., Reiher P. Attacking DDoS at the Source. *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Network Protocols, 12–15 November 2002, Paris, France*. IEEE; 2002. p.312–321. DOI:10.1109/ICNP.2002.1181418
8. Ahmed M., Mahmood A.N., Hu J. A survey of network anomaly detection techniques. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;60:19–31. DOI:10.1016/j.jnca.2015.11.016
9. Alali A., Yousef M. A Survey on Intrusion Detection Systems (IDS) Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Xi'an Shiyu University*. 2022;18(6):183–197.
10. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey. *ACM Computing Surveys*. 2009;41(3):1–58. DOI:10.1145/1541880.1541882. EDN:MYREHF
11. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*. 2015;349(6245):255–260. DOI:10.1126/science.aaa8415

Статья поступила в редакцию 24.07.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 24.07.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 05.09.2025.

Информация об авторах:

БЛИЗНЮК
Михаил Васильевич

сотрудник Управления специальной связи и информации Федеральной службы охраны Российской Федерации в Северо-Западном федеральном округе
 <https://orcid.org/0009-0003-5285-2942>

БЛИЗНЮК
Василий Иванович

кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации
 <https://orcid.org/0009-0005-8085-0738>

ПОСТАРНАК
Андрей Петрович

инженер-исследователь научно-исследовательской и испытательной лаборатория инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0001-5779-2948>

БОЛБЕНКОВ
Александр Владиславович

кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации
 <https://orcid.org/0009-0000-3858-6981>

КИБАЛИН
Антон Юрьевич

сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации
 <https://orcid.org/0009-0006-2247-2799>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.056.53

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-21-27>

EDN:IRBHCD



Алгоритм формирования адаптивной речеподобной помехи для защиты конфиденциальной речевой информации в офисных помещениях

✉ Мария Владимировна Волчихина, mariyamoiseeva@mail.ru

Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, 392000, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность исследования. Современные тенденции развития научной мысли в области информационной безопасности обусловлены ростом числа угроз, связанных с утечкой речевой информации из помещений по акустическим и виброакустическим каналам. Применяемые способы пассивной и активной защиты помещений, основанные на генерации шумов и использовании библиотек предзаписанных звуковых сигналов, не всегда позволяют достичь требуемого уровня защиты из-за отсутствия адаптации к параметрам реальной речи и особенностям акустической обстановки в помещении, а также из-за пренебрежения к требованиям нормативных документов по уровню шума в помещении. Все это обусловило необходимость разработки новых алгоритмов активной защиты офисных помещений от утечки, в частности, по акустовибрационному каналу, основанных на использовании речевых сигналов субъектов переговоров.

Цель исследования заключается в обеспечении требуемого значения коэффициента словесной разборчивости на границе контролируемой зоны офисного помещения на основе совершенствования средств активной защиты информации за счет разработки и применения алгоритма формирования адаптивной к изменению параметров речи субъектов переговоров речевой обстановки в офисном помещении, речеподобной помехи при учете требований нормативных документов по уровню шума. Для решения поставленных задач использованы **методы** теории информации, цифровой обработки сигналов.

Результаты исследования. Разработан алгоритм формирования адаптивной речеподобной помехи для применения в активных средствах защиты информации в офисном помещении. Предложенный алгоритм формирования адаптивной речеподобной помехи позволяет генерировать ее из речевых сигналов субъектов переговоров только при их наличии, что повышает маскирующие свойства помехи.

Научная новизна представленного результата заключается во введении процедур многоканальной генерации формирования адаптивной речеподобной помехи.

Теоретическая значимость исследования состоит в расширении представлений о методах, моделях и способах адаптивного акустического маскирования речевой информации и разработке алгоритма формирования речеподобных помех на основе анализа речевых параметров.

Практическая значимость. Разработанный алгоритм может быть реализован на базе стандартных вычислительных устройств и акустических систем. Это обуславливает его применимость в составе как современных, так и перспективных средств активной защиты речевой информации.

Ключевые слова: алгоритм, безопасность информации, генератор шума, активная защита речевой информации, речеподобная помеха, компенсирующая помеха

Ссылка для цитирования: Волчихина М.В. Алгоритм формирования адаптивной речеподобной помехи для защиты конфиденциальной речевой информации в офисных помещениях // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 21–27. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-21-27. EDN:IRBHCD

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-21-27>

EDN:IRBHCD

An Algorithm for Forming an Adaptive Speech-Like Interference to Protect Confidential Speech Information in Office Spaces

✉ Maria V. Volchikhina, mariyamoiseeva@mail.ru

Tambov State Technical University,
Tambov, 392000, Russian Federation

Annotation

Relevant. Current trends in information security research are driven by the growing number of threats associated with the leakage of speech information from premises via acoustic and vibroacoustic channels. Current methods of passive and active protection of premises, based on noise generation and the use of libraries of pre-recorded audio signals, do not always achieve the required level of protection due to a lack of adaptation to the parameters of real speech and the acoustic environment in the premises, as well as due to disregard for regulatory requirements regarding indoor noise levels. All this has necessitated the development of new algorithms for the active protection of office premises from leakage, particularly via acoustic-vibrational channels, based on the use of speech signals from participants in negotiations.

The aim of the study is to ensure the required verbal intelligibility coefficient at the boundary of a controlled office area by improving active information protection systems through the development and application of an algorithm for generating speech-like interference that is adaptive to changes in the speech parameters of negotiators, the office environment, and noise level regulations. Information theory and digital signal processing methods were used to solve these problems.

In result an algorithm for generating adaptive speech-like interference for use in active information protection systems in offices has been developed. The proposed algorithm for generating adaptive speech-like interference allows it to be generated from the speech signals of negotiators only when they are present, thereby enhancing the interference's masking properties.

The novelty of the study lies in the introduction of multichannel procedures for generating adaptive speech-like interference.

The theoretical significance of this research lies in expanding our understanding of methods, models, and techniques for adaptive acoustic masking of speech information and developing an algorithm for generating speech-like interference based on speech parameter analysis.

Practical significance. The developed algorithm can be implemented using standard computing devices and acoustic systems. This makes it applicable to both current and future active speech protection systems.

Keywords: algorithm, information security, noise generator, active protection of speech information, speech-like interference, compensating interference

For citation: Volchikhina M.V. An Algorithm for Forming an Adaptive Speech-Like in-Terference to Protect Confidential Speech Information in Office Spaces. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):21–27. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-21-27. EDN:IRBHCD

Введение

Современные условия функционирования организаций предъявляют повышенные требования к защите информации, циркулирующей в процессе устных переговоров. Одним из наиболее уязвимых

каналов утечки информации в офисных помещениях является акустовибрационный канал. Технические средства акустической и виброакустической разведки позволяют перехватывать речевые сигналы за пределами офисного помещения через

конструкции и коммуникации здания или посредством направленных микрофонов. Средства реализации активной защиты речевой информации должны быть спроектированы с учетом адаптивных изменений параметров защищаемых каналов, что соответствует современному подходу к динамическому обеспечению безопасности [1].

Одним из эффективных методов защиты от подобных угроз является создание речеподобной помехи (РПП), которая накладывается на исходный речевой сигнал и препятствует его разборчивому восприятию за пределами контролируемой зоны. В отличие от традиционных генераторов шумов, основанных на случайных или библиотечных звуках, в предложенном алгоритме используются непосредственно речевые сигналы субъектов переговоров, что обеспечивает высокую степень подобия спектрально-временных характеристик помехи и защищаемого сигнала. Модель, основанная на наложении гармоник с аппроксимацией экспериментальных спектров, позволяет точно описывать тональные компоненты речи [2].

В статье приведены результаты исследования по обеспечению активной защиты конфиденциальной речевой информации в офисных помещениях от утечек по акустовибрационному каналу при ограничении на уровень создаваемого помеховым сигналом шума. Показано, что алгоритм формирования адаптивной РПП реализует два параллельных процесса. Таким образом, появляется два помеховых сигнала – собственно, речеподобной и компенсирующей помех [3, 4]. Принципиальным отличием предложенного алгоритма является не только использование непосредственно речевых сигналов субъектов переговоров для формирования помех, что позволяет добиться высокой степени спектрального и временного сходства между помехой и защищаемым сигналом, но и акустической обстановки офисного помещения в помеховом сигнале. Реализация такого алгоритма при построении активных средств защиты предполагает необходимость адаптивного изменения параметров помеховых сигналов [5].

Описание предложенного алгоритма

РПП представляет собой сигнал, синтезированный на основе реальных речевых сигналов и модифицированный путем наложения их фрагментов друг на друга с использованием многоканальной обработки. Такой подход обеспечивает сохранение тембральных характеристик речи, ее динамики и спектрального состава, что делает РПП практически неотличимой от исходного речевого потока [6–10].

Суть части алгоритма, отвечающей за формирование, собственно, РПП, заключается в следующем:

- 1) на микрофон подается речевой сигнал субъекта переговоров $S(t)$;
- 2) из речевого сигнала после аналого-цифрового преобразования формируется РПП $S_d^{(РПП)}(i \cdot \Delta t)$ путем наложения фрагментов скрываемого речевого сигнала, поступающих с N каналов (достаточное количество каналов определено экспериментально);
- 3) организуется процедура прерывания излучения помехового сигнала при отсутствии речевого;
- 4) РПП $S_d^{(РПП)}(i \cdot \Delta t)$ подается на звуковую карту ЭВМ, с линейного выхода которой она может быть подана на звуковую колонку, или на внешний вход генератора шума системы защиты информации (СЗИ).

В ходе реализации алгоритма в целях формирования компенсирующей помехи предлагается следующий порядок действий:

- 1) на микрофон подается речевой сигнал субъекта переговоров $S(t)$;
- 2) речевой сигнал после аналого-цифрового преобразования поступает на фазовращатель, в котором происходит инверсия с учетом задержки (формирование компенсирующей помехи) $S_d'(i \cdot \Delta t)$, после чего этот сигнал подается на звуковую карту ЭВМ, с линейного выхода которой компенсирующая помеха $S_d'(t)$ излучается в пространство;
- 3) в контрольных точках съема информации речевой сигнал $S(t)$ складывается с компенсирующей помехой $S_d'(t)$ в пространстве помещения.

Представленная на рисунке 1 схема иллюстрирует структурно-функциональные зависимости между основными этапами алгоритма и последовательность операций, реализующих адаптивное преобразование речевого сигнала.

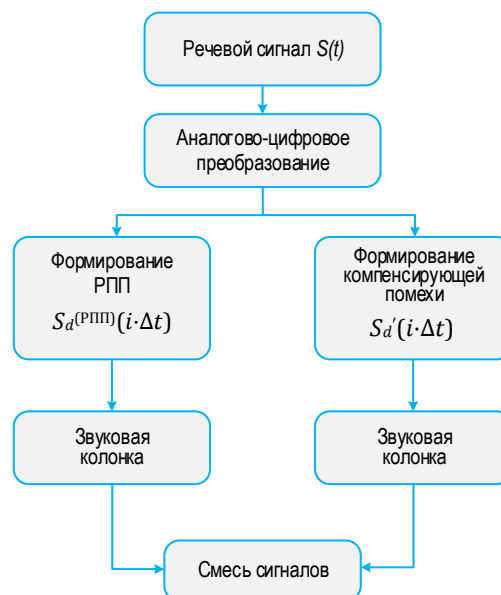


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

Fig. 1. Structural Diagram of the Algorithm

При параллельном формировании, собственно, РПП и компенсирующей помехи в контрольных точках съема информации принимается смесь речевого сигнала, компенсирующей помехи, РПП и помехового сигнала от сторонних источников.

Практическая реализация алгоритма

На практике схема генератора РПП реализуется на базе персонального компьютера, оснащенного звуковой картой. В офисном помещении устанавливаются микрофоны для приема речи и динамики для воспроизведения РПП, размещаемые вблизи потенциальных каналов утечки: окон, дверей и стен (рисунок 2). Такая организация позволяет обеспечить маскировку речи в контрольных точках (КТ1 – КТ4), расположенных за пределами офиса.

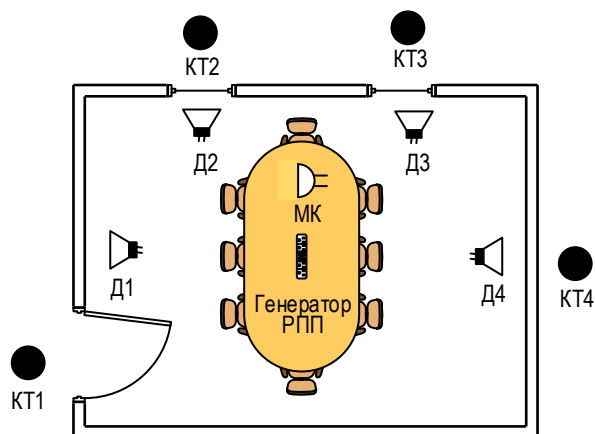


Рис. 2. Положение контрольных точек съема информации и генератора адаптивной речеподобной помехи

Fig. 2. The Position of the Control Points for Information Collection and the Adaptive Speech-Like Interference Generator

Процесс формирования и излучения сигналов проходит в следующей последовательности:

- 1) микрофон принимает речевые сигналы субъектов переговоров;
- 2) генератор адаптивной РПП формирует помеховый сигнал;

3) акустомат обеспечивает автоматическое прерывание генерации в паузах;

4) динамики излучают сформированный сигнал в пространство помещения, создавая акустическую маскировку.

Экспериментальные исследования

Источником для формирования помехового сигнала в генераторе РПП служит выходной сигнал микрофона, установленного в помещении. Процесс многоканального формирования РПП представлен на рисунке 3.

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторной установки. Комплекс включал прототип автоматизированного программно-аппаратного средства генерации адаптивной РПП, реализованный на базе персональной ЭВМ со специализированным программным обеспечением, а также акустическую систему, анализатор спектра, шумомер и цифровой диктофон, предназначенные для регистрации и анализа параметров сигналов в контрольных точках.

Контрольная точка съема располагалась за дверным проемом, не оборудованным звукоизолирующими элементами, что обеспечивало моделирование реальных условий возможной утечки речевой информации через акустический канал. Измерения проводились при воспроизведении тестового речевого сигнала средней громкости, соответствующего типовой речи. В качестве эталонного средства защиты использовался генератор белого шума типа «Соната-АВ».

Показателем качества защиты выбран уровень словесной разборчивости речевого сигнала, определяемый по методике Н.Б. Покровского с учетом модификаций, предложенных Я.И. Железняком, Ю.К. Макаровым и А.А. Хоревым [10–16]. Сравнение производилось для двух режимов: при использовании традиционного белого шума и при работе адаптивного генератора РПП.

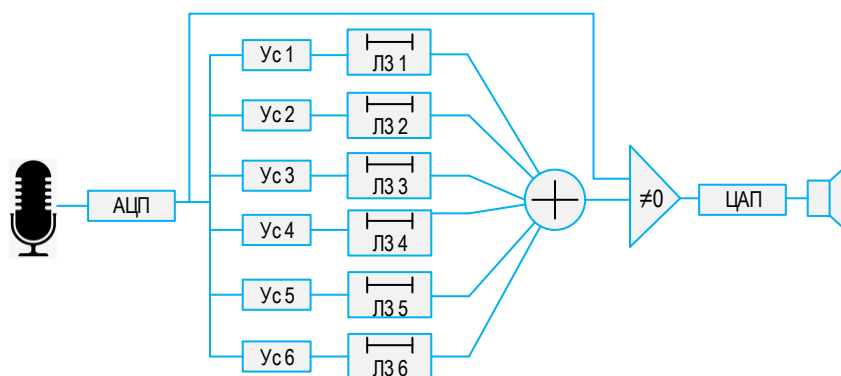


Рис. 3. Процесс многоканального формирования речеподобной помехи

Fig. 3. The Process of Multi-Channel Formation of Speech-Like Interference

Результаты исследований показали, что адаптивная РПП обеспечивает существенное снижение словесной разборчивости речи в контрольной точке по сравнению с белым шумом. При этом сохраняется стабильность маскирующего эффекта при изменении речевой обстановки, что подтверждает высокую степень соответствия разработанного алгоритма реальным акустическим условиям офисных помещений. Экспериментальные данные демонстрируют, что применение предложенного алгоритма позволяет обеспечить требуемый уровень защиты речевой информации в границах контролируемой зоны.

Как показали результаты исследований, проведенных с применением разработанного алгоритма, увеличение количества каналов формирования помеховых сигналов приводит к изменению как спектра генерируемой помехи, так и ее амплитуды [17, 18]. Эти изменения заметны уже при переходе от трехканальной схемы (рисунок 4а) к четырехканальной (рисунок 4б) (амплитуда результирующего сигнала возрастает, а спектр становится более сглаженным и приближенным к спектру речи). Поэтому в процессе эксперимента определялось целесообразное количество каналов. В результате установлено, что увеличение каналов больше шести не приводит к существенным изменениям спектра генерируемой помехи.

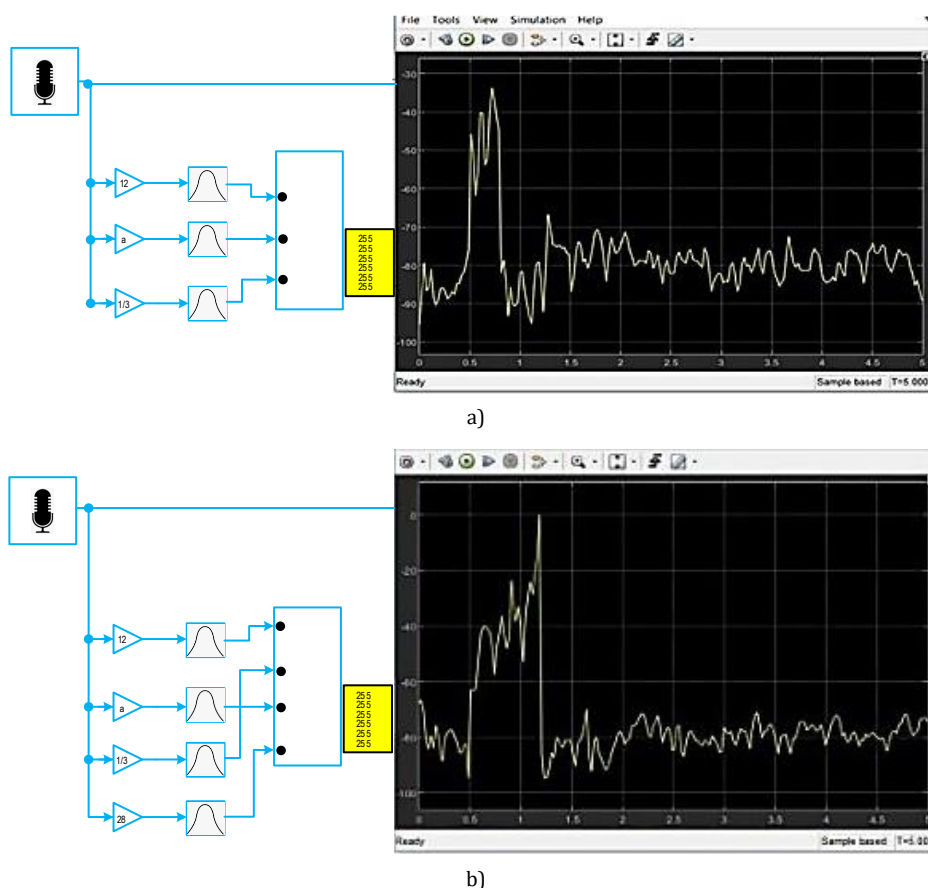


Рис. 4. Трехканальная (а) и четырехканальная (б) схемы генератора речеподобной помехи

Fig. 4. Three-Channel (a) and Four-Channel (b) Speech-Like Noise Generator Circuits

Закключение

Основным отличием разработанного алгоритма от традиционных генераторов шума (например, «Барон», «Эхо», «Шаман») является использование не предзаписанных заранее звуков, а реальных речевых сигналов субъектов переговоров. Такой подход обеспечивает высокую степень приближения

формируемой средством активной защиты информации помехи к исходному речевому сигналу и исключает возможность выделения информативных компонентов речи при его перехвате.

Увеличение числа каналов (свыше шести) приводит к усложнению аппаратной реализации и росту стоимости системы при отсутствии заметного улучшения характеристик формируемой помехи.

Предложенный алгоритм формирования адаптивной РПП и компенсирующей помехи следует рассматривать как перспективное направление развития средств защиты речевой информации в офисных помещениях [18].

Проведенные исследования позволили подтвердить высокую степень спектрального сходства помехи с речевым сигналом, способность алгоритма адаптироваться к изменениям акустической обстановки, а также целесообразность совместного использования РПП и компенсирующей помехи для повышения уровня защиты.

Алгоритм может быть реализован на базе стандартных вычислительных устройств и акустических систем, что обуславливает его применимость в составе современных систем защиты информации нового поколения. Результаты оценки эффективности применения алгоритма, проведенной артикуляционными и инструментально-расчетными методами, позволили сделать вывод [19], что его применение эффективнее алгоритмов создания РПП, применяемых в существующих СЗИ более, чем на 20 %.

Список источников

1. Супрун А.Ф. Техническая защита информации: учеб. пособие для вузов. Часть 1. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. 242 с.
2. Голубинский А.Н. Расчёт частоты основного тона речевого сигнала на основе полигармонической математической модели // Вестник Воронежского института МВД России. 2009. № 1. С. 81–90. EDN:JXUTKN
3. Волчихина М.В., Фурсова А.В. Модель адаптации параметров средства защиты информации к параметрам речи субъектов переговоров в помещении офисного типа // Вестник Воронежского института МВД России. 2024. № 1. С. 108–114. EDN:NLOJVC
4. Волчихина М.В. Метод адаптации параметров средств защиты информации на основе дискретного изменения амплитуды и тембра субъектов переговоров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28. № 2. С. 226–234. DOI:10.17277/vestnik.2022. 02.pp.226-234. EDN:AXWBIH
5. Шелухин О.И. Сетевые аномалии. Обнаружение, локализация, прогнозирование. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 447 с.
6. Каторин Ю.Ф., Разумовский А.В., Спивак А.И. Защита информации техническими средствами: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 416 с.
7. Царегородцев А.В., Тараскин М.М. Методы и средства защиты информации в государственном управлении. М.: Проспект, 2017. 205 с.
8. Лыньков Л.М., Голиков В.Ф., Борботько Т.В. Основы защиты информации и управления интеллектуальной собственностью. Минск: БГУИР, 2013. 243 с.
9. Ворона В.А., Костенко В.О. Способы и средства защиты информации от утечки по техническим каналам // Computational Nanotechnology. 2016. № 3. С. 208–223. EDN:WKNQZD
10. Хорев А.А. Техническая защита информации. М.: НИЦ «Аналитика», 2008. 436 с.
11. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 415 с. EDN:QMOJMV
12. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Госстандарт России, 1997. 230 с.
13. Дворянkin С.В., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Обоснование критериев эффективности защиты речевой информации от утечки по техническим каналам // Защита информации. Инсайд. 2007. № 2(14). С. 18–25. EDN:TRKKQR
14. Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. 2000. № 4. С. 39–45. EDN:YPUIBV
15. Хорев А.А. Способы защиты выделенных помещений от утечки речевой (акустической) информации по техническим каналам: системы виброакустической защиты // Специальная техника. 2013. № 4. С. 31–63. EDN:RINYMP
16. Макаров Ю.К., Хорев А.А. Методы защиты речевой информации и оценки их эффективности // Защита информации. Конфидент. 2001. № 4. С. 22–33.
17. Дворянkin С.В., Дворянkin Н.С., Устинов Р.А. Развитие технологий образного анализа-синтеза акустической (речевой) информации в системах управления, безопасности и связи // Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26. № 1. С. 64–76. EDN:VWAQNW
18. Алексеев В.В., Гриднев В.А., Моисеева М.В., Рыжков А.П., Яковлев А.В. Теоретические основы построения и применения научно-исследовательского комплекса мониторинга характеристик защищенности конфиденциальной информации: монография. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. 100 с.
19. Волчихина М.В. Оценка уровня словесной разборчивости на границе контролируемой зоны офисного помещения артикуляционным методом // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 2. С. 105–112. EDN:POMJEB

References

1. Suprun A.F. *Technical Information Security. Part 1*. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ.; 2021. 242 p. (in Russ.)
2. Golubinskiy A.N. Calculation of the Pitch Frequency of a Speech Signal on the Basis of Polyharmonic Mathematical Model. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*. 2009;1:81–89. (in Russ.) EDN:JXUTKN

3. Volchikhina M.V., Fursova A.V. Model of Adaptation of Information Security Means Parameters to Speech Parameters of Negotiation Subjects in an Office-Type Premises. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*. 2024;1: 108–114. (in Russ.) EDN:NLOJVC
4. Volchikhina M.V. A Method for Adapting the Parameters of Information Security Tools Using a Discrete Change in the Amplitude and Timbre of the Subjects of Negotiations. *Transactions of TSTU*. 2022;28(2):226–234. (in Russ.) DOI:10.17277/ vestnik.2022.02.pp.226-234. EDN:AXWBIH
5. Sheluhin O.I. *Network Anomalies. Detection, Localization, Forecasting*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom Publ.; 2020. 447 p. (in Russ.)
6. Katorin Yu.F., Razumovsky A.V., Spivak A.I. *Information Security by Technical Means*. St. Petersburg: National Research University ITMO Publ.; 2012. 416 p. (in Russ.)
7. Tsaregorodtsev A.V., Taraskin M.M. *Methods and Means of Information Protection in Public Administration*. Moscow: Prospect Publ.; 2017. 205 p. (in Russ.)
8. Lynkov L.M., Golikov V.F., Borbotko T.V. *Fundamentals of Information Protection and Intellectual Property Management*. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ.; 2013. 243 p. (in Russ.)
9. Vorona V.A., Kostenko V.O. Ways and Means of Information Protection from Leaks Through Technical Channels. *Computational Nanotechnology*. 2016;3:208–223. (in Russ.) EDN:WKNGZD
10. Khorev A.A. *Technical Information Security*. Moscow: Analitika Publ.; 2008. 436 p. (in Russ.)
11. Buzov G.A., Kalinin S.V., Kondratyev A.V. *Protection against Information Leakage via Technical Channels*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom Publ.; 2005. 415 p. (in Russ.) EDN:QMOJMV
12. GOST R 50840-95. *Speech transmission over varies communication channels. Techniques for measurements of speech quality, intelligibility and voice identification*. Moscow: Gosstandart Rossii Publ.; 1997. 230 p. (in Russ.)
13. Dvoryankin S.V., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Justification of the Criteria for the Effectiveness of Speech Information Protection from Leakage via Technical Channels. *Zašita informacii. Inside*. 2007;2(14):18–25. (in Russ.) EDN:TRKKQR
14. Zheleznyak V.K., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Some Methodological Approaches to Assessing the Efficiency of Speech Information Protection. *Specialnaya tekhnika*. 2000;4:39–45. (in Russ.) EDN:YPUIBV
15. Khorev A.A. Methods and Means for Protection of Compartmentalized Security Zones Against Voice (Acoustic) Information Leakage Through Service Channels: Speech Protection Systems. *Specialnaya tekhnika*. 2013;4:31–63. (in Russ.) EDN:RINYMP
16. Makarov Yu.K., Khorev A.A. Methods of Speech Information Protection and Evaluation of Their Effectiveness. *Zašita informacii*. Confidential. 2001;4:22–33. (in Russ.)
17. Dvoryankin S.V., Dvoryankin N.S., Ustinov R.A. Improvement of Image Analysis/Synthesis Technologies of Acoustic (Speech) Information for the Control, Safety and Communication Systems. *IT Security (Russia)*. 2019;26(1):64–76. (in Russ.) EDN:VWAQNW
18. Alekseev V.V., Gridnev V.A., Moiseeva M.V., Ryzhkov A.P., Yakovlev A.V. *Theoretical Foundations for the Construction and Application of a Research Complex for Monitoring the Security Characteristics of Confidential Information*. Tambov: Tambov State Technical University Publ.; 2022. 100 p. (in Russ.)
19. Volchikhina M.V. Assessment of the Level of Verbal Intelligibility at the Border of the Controlled Zone of the Office Premises by the Articulation Method. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*. 2022;2:105–112. (in Russ.) EDN:POMJEB

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 10.10.2025.

The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 10.10.2025.

Информация об авторе:

ВОЛЧИХИНА
Мария Владимировна

специалист отдела аттестации научных и научно-педагогических кадров
Тамбовского государственного технического университета
 <https://orcid.org/0009-0004-6476-8614>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.3

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-28-40>

EDN:YMAXGQ



Системный подход разработки архитектуры аналитических цифровых платформ

Алексей Анатольевич Шамин¹, al.shamin@mail.ru

Михаил Олегович Колбанев², mokolbanev@mail.ru

Артем Дмитриевич Черемухин¹✉, ngieu.cheremuhin@yandex.ru

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
Княгинино, 606240, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, 125993, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В условиях стремительного развития цифровой экономики архитектуры цифровых платформ становятся ключевым предметом научного и прикладного анализа. При этом большинство существующих таксономий и классификаций цифровых платформ сосредоточены на целях, функциях или бизнес-моделях, в то время как архитектурные особенности зачастую остаются недостаточно структурированными. Особенно остро стоит вопрос в отношении архитектур аналитических цифровых платформ, сочетающих в себе функциональность традиционных цифровых решений и методов машинного обучения, что требует комплексного системного подхода к их описанию и проектированию.

Цель исследования состоит в систематизации и анализе архитектурных компонентов цифровых платформ с позиций различных подходов системного анализа, а также в проектировании прототипа функциональной архитектуры цифровой аналитической платформы на примере аграрной сферы. В работе **применены методы** системного анализа, таксономического моделирования, сравнительной типологизации, а также проектного синтеза архитектурных решений с использованием функционального, структурного, объектно-ориентированного, кибернетического, сетевого, эволюционного и онтологического подходов.

Результаты. Сформирована обобщенная модель архитектуры аналитической цифровой платформы с указанием состава подсистем, элементов, связей, границ, среды и идентификаторов в каждом из семи подходов системного анализа. В качестве примера разработана архитектура прототипа платформы анализа рентабельности сельскохозяйственных организаций, реализующая пайплайн обработки, анализа, прогнозирования и визуализации данных.

Новизна исследования заключается в комплексном применении всех ключевых подходов системного анализа к описанию архитектур аналитических цифровых платформ, а также в формализации архитектуры, интегрирующей уровни данных, моделей, сценариев и онтологического описания сущностей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной архитектурной модели при проектировании цифровых платформ поддержки решений в отраслях, требующих сложной аналитики.

Ключевые слова: цифровая платформа, аналитическая система, архитектура, системный анализ, машинное обучение, функциональный подход, структурный подход, объектно-ориентированный подход, кибернетическая система, эволюционное моделирование, онтология

Ссылка для цитирования: Шамин А.А., Колбанев М.О., Черемухин А.Д. Системный подход разработки архитектуры аналитических цифровых платформ // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 28–40. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-28-40. EDN:YMAXGQ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-28-40>

EDN:YMAXGQ

A Systems Approach to the Architecture Design of Analytical Digital Platforms

 **Aleksey A. Shamin**¹, al.shamin@mail.ru

 **Mikhail O. Kolbanev**², mokolbanev@mail.ru

 **Artem D. Cheremuhin**¹✉, ngieu.cheremuhin@yandex.ru

¹Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University,
Knyaginino, 606240, Russian Federation

²Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI",
Saint-Petersburg, 125993, Russian Federation

Annotation

*In the context of the rapid development of the digital economy, the architectures of digital platforms have become a key subject of scientific and applied analysis. Most existing taxonomies and classifications of digital platforms focus on goals, functions, or business models, while architectural aspects often remain insufficiently structured. This issue is particularly **relevant** for analytical digital platforms, which combine the functionality of traditional digital systems with machine learning methods, thus requiring a comprehensive systems-based approach to their description and design.*

*The **aim of the study** is to systematize and analyze the architectural components of digital platforms from the standpoint of various approaches to system analysis, as well as to design a prototype of the functional architecture of a digital analytical platform using the example of the agricultural sector. The research employs **methods** of systems analysis, taxonomic modeling, comparative typology, and architectural design synthesis using functional, structural, object-oriented, cybernetic, network-based, evolutionary, and ontological approaches.*

*The **result** is a generalized model of the architecture of an analytical digital platform, identifying its subsystems, elements, relationships, boundaries, environment, and identifiers according to each of the seven systems analysis approaches. As a practical example, the architecture of a prototype platform for analyzing the profitability of agricultural organizations is developed, implementing a pipeline for data processing, analysis, forecasting, and visualization.*

*The **novelty** of the study lies in the comprehensive application of all major systems analysis approaches to the description of analytical platform architectures and in the formalization of an architecture that integrates data levels, models, scenarios, and ontological entity descriptions.*

*The **practical significance** of the work is the potential use of the proposed architectural model in the design of digital decision-support platforms in industries requiring advanced analytics.*

Keywords: digital platform, analytical system, architecture, systems analysis, machine learning, functional approach, structural approach, object-oriented approach, cybernetic system, evolutionary modeling, ontology

For citation: Shamin A.A., Kolbanev M.O., Cheremuhin A.D. A Systems Approach to the Architecture Design of Analytical Digital Platforms. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):28–40. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-28-40. EDN:YMAXGQ

Введение

В современных условиях центральную роль в функционировании экономики данных играют цифровые платформы, что актуализирует вопросы их организации, и в частности выводит на первый план вопросы архитектуры цифровых платформ.

В работе [1] представлена попытка разработки таксономий промышленных цифровых платформ интернета вещей (IoT, аббр. от англ. Internet of Things), целью которых является оптимизация производственных процессов, повышение эффективности оборудования и создание новых воз-

возможностей для бизнеса. В таблице 1 представлена характеристика четырех основных архитектурных «послойных» компонента данных платформ.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика основных архитектурных компонентов данных платформ

TABLE 1. Characteristics of the Main Architectural Components of These Platforms

Название слоя	Компоненты и их варианты
Инфраструктурный	– Поддержка оборудования (агностическое или сертифицированное) – Варианты размещения платформы (облачное, локальное, гибридное) – Методы обработки данных (edge, fog, onplatform)
Сетевой	– Физическая передача данных (проводные, беспроводные технологии: короткий радиус, сотовые сети, LPWAN) – Логическая передача данных (протоколы интернета, специфичные для IoT или для отрасли)
Слой промежуточного программного обеспечения	– Структура данных (структурированные и неструктурированные) – Типы аналитики (описательная, оперативная, предсказательная, предписывающая) – Технологии аналитики (базовые или продвинутое, такие как машинное обучение)
Приложения	– Типы API (стандартизированные, кастомные) – Деллой приложений (родные платформы, контейнеры, вне платформ) – Маркетплейсы (внутренние, внешние, отсутствие)

Авторами статьи [1] были выделены 5 основных архетипов архитектур цифровых платформ.

Архетип 1. Универсалы (Allrounders) поддерживают агностическое оборудование; предоставляют все варианты размещения (облачное, локальное, гибридное); реализуют разнообразные способы передачи данных, включая проводные, беспроводные (LPWAN, сотовые сети); используют продвинутую аналитику (все типы аналитики) и технологии машинного обучения; интегрируют стандартизированные API; приложения размещаются на платформе. Присутствует внутренний маркетплейс.

Архетип 2. Минималисты (Purists) демонстрируют фокус на публичных облаках и onplatform-обработке данных; используют ограниченные варианты передачи данных; ориентированы на проводные и короткодиапазонные беспроводные технологии; используют базовую аналитику (описательная и оперативная), ее интеграция минимальна; предпочитают родные для платформы приложения. Для минималистов свойственно отсутствие маркетплейса или наличие внешних вариантов.

Архетип 3. Аналитики (Analysts) – инфраструктура нацелена на поддержку всех типов обработки

данных (edge, fog, onplatform); сделан акцент на отраслевые протоколы передачи данных; присутствует сильный фокус на продвинутой аналитике (предсказательная, предписывающая), интеграции бизнес- и производственных систем; приложения в основном размещаются на платформе и имеют закрытый исходный код.

Архетип 4. Коннекторы (Connectors) – инфраструктура поддерживает как сертифицированное, так и агностическое оборудование; характерен сильный акцент на fog-обработке данных. Коннекторы предоставляют широкие возможности передачи данных (в том числе LPWAN, сотовые сети); включают базовую аналитику и интеграцию с внешними системами; работают со стандартизированными API; имеют внутренний маркетплейс.

Архетип 5. Интеграторы (Integrators) – присутствует сильный акцент на сертифицированное оборудование и гибридные модели размещения; используются отраслевые протоколы и проводные технологии; замечен акцент на интеграцию с внешними производственными системами; используются структурированные данные; сделан упор на кастомизированные API и приложения, развертываемые в контейнерах.

Работа [2] посвящена особенностям цифровых платежных платформ (специализированных систем, обеспечивающих выполнение платежных операций с использованием различных форм цифровых технологий). Авторы выделили основные составляющие их архитектуры (степень централизованности, транзакционности и виртуальности) и идентифицировали 4 основных типа платформ по их архитектуре:

1) местные (для развития локальной экономики и укрепления социальных связей), поддерживают как стандартные (карты, POS), так и динамические (мобильные приложения) архитектуры, а также обеспечивают обратимость в официальную валюту и требуют физического взаимодействия для транзакций;

2) проприетарные (для поддержки социальных программ и управления местными экономиками), часто базируются на стандартных архитектурах, как правило, характеризуется централизованным управлением и ограниченным географическим покрытием;

3) общественные (для содействия обмену услугами и товарами внутри сообщества), обычно характеризуются минимальными технологическими требованиями, одноуровневыми транзакциями и отсутствием обратимости в официальные валюты;

4) киберплатформы (альтернативные финансовые системы на основе криптовалют), применяющие технологии блокчейна.

В работе [3] исследуются цифровые научные платформы, но они рассматриваются только с точки зрения целей их субъекта и делятся на государственные, рыночные и научные.

Авторы статьи [4] выделили *3 архетипа цифровых платформ* на основе 4-х измерений: инфраструктура (прямой, косвенный, открытый доступ); техническое ядро (открытость ресурсов, закрытость для инноваций или высокая интеграция); экосистема (частные или федеративные сети); цифровые услуги (ориентация на обмен или на дизайн).

1. *Платформы оркестровки* ориентированы на внешние связи, обладают высокой степенью открытости ресурсов и доступа, основываются на федеративных сетях, которые включают независимых третьих сторон, предназначены для координации экосистем для максимизации сетевого эффекта и роста).

2. *Платформы объединения* ориентированы внутрь, обладают закрытой инфраструктурой, основываются на частных сетях с ограниченным доступом и контролем ресурсов для создания эксклюзивного бизнес-пространства для внутренних операций без вмешательства третьих сторон).

3. *Инновационные платформы.*

При этом необходимо обратить внимание на отсутствие непосредственного фокуса именно на особенностях архитектуры цифровых платформ и их ключевые измерения.

Однако все рассмотренные таксономии имеют лишь косвенный акцент на различиях в архитектуре. Кроме того, в современных условиях кажется неполным рассмотрение составляющих архитектур платформ в «вакууме», по мнению авторов, более верным будет комплексный подход – взаимное рассмотрение архитектур методов машинного обучения и архитектур цифровых платформ с учетом особенностей разных уровней цифровой экономики, что особенно важно ввиду ее динамичного развития [5–10].

Основные подходы системного анализа и их применение к анализу структуры цифровых платформ

С точки зрения системного анализа, каждое «целое» состоит из следующих составляющих:

- подсистемы (части, обладающие относительной автономностью и выполняющие специфические функции);
- элементы (минимальные компоненты, которые не делятся дальше в рамках текущего анализа);
- связи (взаимодействия между элементами и подсистемами – потоки данных, управление, ресурсы);

– границы (правила, которые определяют, какие элементы входят в рассматриваемый объект, а какие находятся во внешней среде);

– среда (внешние факторы, которые влияют на систему);

– уникальные идентификаторы.

При этом в зависимости от подхода различается типология выделяемых объектов; всего можно выделить *7 основных подходов к идентификации* основных составляющих.

Функциональный подход [11] базируется на делении в системе функциональных блоков, ориентированных на выполнение определенных задач. Объектами анализа в этом случае выступают функции, потоки входов и выходов, каналы передачи ресурсов и информации. На практике функциональный подход реализуется в виде построения бизнес-процессов (например, нотация BPMN), функциональных блок-схем в инженерии, а также в модульной декомпозиции программных систем (модули расчета, аналитики, визуализации и др.).

Структурный подход [12] предполагает выделение элементов системы и установление их иерархических и межкомпонентных связей. Основными объектами здесь являются компоненты, подсистемы, уровни иерархии, а также каналы взаимодействия. В практической плоскости данный подход находит применение при проектировании организационных структур, создании архитектурных диаграмм (например, UML-диаграмм компонентов), построении инженерных схем. Он позволяет описывать конфигурацию системы, выявлять узлы уязвимости и оптимизировать структурные взаимосвязи.

Объектно-ориентированный подход [13] трактует систему как совокупность объектов, обладающих состояниями и поведением. На практике он широко используется в объектно-ориентированном программировании, построении UML-диаграмм классов и объектов, разработке API-интерфейсов и цифровых сервисов. Объектный подход обеспечивает высокую модульность, повторное использование компонентов и расширяемость системы.

Кибернетический (процессно-управленческий) подход акцентирует внимание на процессах управления, обратной связи и информационных потоках. В рамках данного подхода [14] выделяются управляющие и управляемые подсистемы, регуляторы, сенсоры, целевые установки и механизмы корректировки. Практическая реализация включает автоматизированные системы управления, архитектуры адаптивного искусственного интеллекта (ИИ), нейросетевые модели с обратной связью, а также системы мониторинга и прогнозирования. Подход особенно актуален при построении систем с высокой степенью автономности и адаптивности.

Сетевой подход рассматривает систему как совокупность взаимосвязанных узлов (агентов), между которыми происходят взаимодействия [15]. Основными объектами анализа являются узлы, связи, маршруты и метрики сети (центральность, плотность, связность). В практической реализации сетевой подход применяется при проектировании цифровых платформ, социальных и логистических сетей, систем IoT, а также при построении графов знаний. Он позволяет анализировать устойчивость, масштабируемость и адаптивность распределенных систем.

Генетико-эволюционный подход [16] фокусируется на эволюции системы во времени, исследуя механизмы изменения структуры и поведения. В качестве объектов анализа рассматриваются фазы развития, механизмы мутаций, наследования и отбора. На практике он применяется в генетических алгоритмах и эволюционном моделировании, при разработке адаптивных архитектур ИИ, анализе жизненного цикла программных продуктов и систем организационного развития.

Онтологический подход направлен на формализацию знаний о системе через построение онтологий [17] – структурированных моделей сущностей и отношений. Выделяются сущности, атрибуты, типы связей и логические правила вывода. Подход применяется в построении онтологий, формализации семантических сетей, когнитивных архитектур, системах объяснимого ИИ и семантического поиска.

Рассмотрим особенности цифровых платформ как системы с точки зрения каждого подхода на примере любого маркетплейса [18].

Изучая цифровые платформы с точки зрения функционального подхода, отметим, что роль подсистем выполняют функциональные блоки платформы (например, каталог, оплата, аналитика) – это логически обособленные части, выполняющие ключевые бизнес-задачи и организованные в микросервисную структуру. Элементами в данном случае выступают атомарные функции, такие как оформление заказа или фильтрация (т.е. конкретные действия пользователя или процессы, происходящие в системе). Связями между элементами являются функциональные потоки – потоки данных, управления и ресурсов, а также API-вызовы, webhooks и очереди сообщений. Границами системы служат рамки бизнес-процессов, включая переход данных между блоками и завершение одного процесса с началом другого. Средой системы являются внешние сервисы, такие как банки, логистика, партнерские системы, формирующие контекст функционирования платформы. Идентификаторами в системе служат коды функ-

ций, trace ID, уникальные идентификаторы процессов и логическая адресация действий.

С точки зрения структурного подхода, подсистемами платформы выступают архитектурные компоненты — frontend, backend, базы данных, интеграционные шлюзы, представляющие собой логически и технически разделенные слои цифровой платформы. Элементами являются конкретные компоненты реализации – части интерфейса, контроллеры, таблицы баз данных и API-интерфейсы. Связями служат физические и логические интерфейсы, включая REST, RPC, конфигурационные файлы, обеспечивающие взаимодействие между архитектурными уровнями. Границы системы определяются архитектурной декомпозицией, включающей перечень компонентов и их интерфейсов с внешней средой. Средой выступает инфраструктура: облачные решения, хостинг, DevOps-инструменты, представляющие внешнее окружение архитектуры. Идентификаторы обозначены архитектурными тегами, версиями, маршрутами API (т.е. средствами структурной адресации компонентов).

С точки зрения объектно-ориентированного подхода, подсистемами являются классы объектов, такие как User, Product, Order, – логически организованные группы сущностей, обладающие общими атрибутами и поведением. Элементами системы служат экземпляры этих объектов с конкретными атрибутами и методами, например User.name, Product.price, Order.total, реализуемые как в программном коде, так и в базах данных. Связями между ними выступают ассоциации, агрегации и композиции – логические и программные зависимости объектов. Границы определяются областью действия объектов, их зоной видимости, правами доступа, а также жизненным циклом экземпляров. Среда включает внешние классы, API и устройства (контексты, в которых функционируют объекты). В качестве идентификаторов выступают ID, slug, хеши – уникальные ссылки на конкретные экземпляры.

В рамках кибернетического подхода подсистемы представляют собой управляющие и управляемые компоненты: алгоритмы рекомендаций, пользовательский интерфейс, A/B тестирование (выполняет управляющие функции). Элементами системы становятся сенсоры (например, трекеры поведения) и регуляторы (алгоритмы персонализации), обеспечивающие процессы кибернетического управления. Связи в системе выражаются через сигналы обратной связи и управляющие воздействия, обеспечивающие передачу управляющей информации. Границами системы служат рамки управляющих алгоритмов и зоны интерфейса или поведения, на которые направлено управление. Внешняя среда включает рыночные сигналы и пользо-

вательские предпочтения, формирующие информационный контекст. Идентификаторами служат параметры настройки, управляющие ключи и адресация алгоритмов управления.

С точки зрения сетевого подхода, подсистемы формируются кластерными зонами и сетевыми сервисами – объединениями пользователей, товаров и сервисов по принципу взаимодействия. Элементами системы выступают отдельные узлы сети: пользователи, сервисы, продукты, т. е. сущности, участвующие во взаимодействиях. Связями являются информационные и транзакционные потоки, а также граф взаимодействия между участниками системы. Границы системы определяются топологией сети – техническими и организационными ограничениями подключения узлов. Средой являются сторонние платформы, внешние пользователи и сервисы, расширяющие цифровую экосистему. В качестве идентификаторов применяются адреса узлов, ключи доступа, API-токены, позволяющие идентифицировать сетевых участников.

При рассмотрении цифровой платформы *в рамках генетико-эволюционного подхода* подсистемами являются фазы и версии платформы – от минимально жизнеспособного продукта до зрелой архитектуры, отражающие этапы развития. Элементами становятся изменяемые параметры, A/B варианты и функциональные модули – основа для адаптации системы. Связи выражаются в виде зависимостей между версиями и модулями, указывающих на эволюционные изменения конфигураций. Границы определяются фазами жизненного цикла, разделением на экспериментальные и стабильные зоны. Среда представлена трендами, пользовательской обратной связью и поведением пользователей – внешними факторами, влияющими на адаптацию. Идентификаторы включают коды изменений, номера версий и эволюционные метки, отражающие историю развития системы.

При онтологическом подходе подсистемами выступают онтологические классы сущностей: пользователь, заказ, товар, категория, формирующие формальные группы понятий. Элементами являются конкретные онтологические сущности, такие как категории, профили, транзакции, – структурные элементы формализованной модели знаний. Связи между ними представлены семантическими отношениями, такими как *isA*, *partOf*, *belongsTo*, формализующими логику взаимодействия между сущностями. Границы системы определяются рамками онтологии – перечнем включенных и исключенных понятий. Среда формируется за счет внешних онтологий и открытых графов знаний, расширяющих понятийную модель платформы. Идентификаторы включают URI, индексы RDF, а также уникальные идентификаторы сущностей в

графе знаний, обеспечивающие онтологическую адресацию.

Понятие аналитической цифровой платформы и составляющих ее архитектуры

Большая часть современных платформ данных поддерживает проведение аналитических работ; таким образом, можно говорить о возникновении аналитических цифровых платформ [19] – типа цифровой платформы, ориентированной на комплексное извлечение, обработку, интерпретацию и представление знаний на основе собранных данных, обеспечивающий поддержку интеллектуального анализа, прогнозирования и принятия решений в различных предметных областях. Соответственно, составляющие аналитических цифровых платформ должны включать в себя компоненты и цифровых платформ, и методов обучения. Определение составляющих системы аналитической цифровой платформы в разных подходах системного анализа представлено ниже.

С позиции функционального подхода подсистемами аналитической цифровой платформы являются модули подготовки данных, анализа, визуализации и прогноза, а также интерфейсы взаимодействия. В рамках пайплайна аналитической обработки они соответствуют этапам предобработки, обучения, тестирования и прогнозирования. Элементами платформы выступают функции фильтрации, агрегации, расчета индикаторов, а также процедуры предобработки, отбора признаков, обучения модели и вычисления метрик. Связями являются потоки данных между модулями аналитической платформы, включая передачу информации между этапами пайплайна. Границы системы определяются рамками аналитических сценариев и задач, а также переходами между фазами: обучением, прогнозом и практическим применением модели. Среда составляют внешние источники данных и внешние отчеты, включая обучающие выборки и тестовое окружение. В качестве идентификаторов используются уникальные идентификаторы отчетов, пользователей, аналитических задач, моделей, экспериментов и пайплайнов.

Согласно структурному подходу, аналитическая цифровая платформа состоит из архитектурных блоков, таких как хранилища данных, вычислительные движки, визуализаторы и API-интерфейсы. Эти блоки включают компоненты загрузки данных, моделей, вычислительных модулей и библиотек. Элементами системы являются отдельные сервисы, компоненты визуализации, базы данных, слои нейронных сетей, скрипты и программные модули. Связи формируются через API-запросы и протоколы передачи данных, а также взаимодействие архитектурных слоев и вызовы моделей.

Границы системы определяются интерфейсами подключения модулей и источников данных, а также границами между компонентами модели и областью действия кода. Внешнюю среду составляют ИТ-инфраструктура, облачные сервисы, инфраструктура обучения и хранилища моделей. Идентификаторы представлены маршрутами API, версиями компонентов, именами скриптов и идентификаторами слоев модели.

При объектно-ориентированном рассмотрении подсистемами платформы являются типы аналитических объектов: отчеты, дашборды, модели, аналитические сценарии. Также включаются логические объекты, такие как Dataset, Model, Metric, Optimizer. Элементами системы служат конкретные экземпляры объектов: отчеты, графики, панели, аналитические запросы, а также объекты Model, Metric и Dataset с конкретными параметрами. Связи представлены зависимостями между объектами, ассоциациями между сущностями и их атрибутами. Границы определяются областями действия аналитических объектов и применимости модели, а также зоной видимости классов. Среда включает пользователей, системы поддержки принятия решений, внешние классы и интерфейсы. Идентификаторами выступают уникальные метки аналитических объектов и идентификаторы их экземпляров.

В рамках кибернетического подхода подсистемами являются управляющие блоки: планировщики, триггеры, системы автоматизации сценариев, контроллеры качества модели, оптимизаторы и функции потерь. Элементами служат настройки автоматизации, параметры уведомлений, сенсоры качества, механизмы типа learning rate scheduler и другие регуляторы. Связи реализуются в форме правил автоматизации, сигналов событий, обратной связи и параметрической корректировки. Границы системы определяются диапазоном действия автоматизации и аналитических компонентов, а также охватом управляющих механизмов. Среда включает внешние события, ключевые показатели эффективности, производственные метрики, требования к качеству и внешние сигналы. Идентификаторы представлены параметрами автоматизации, уведомлениями, управляющими параметрами и флагами моделей.

Согласно сетевому подходу, подсистемами выступают сетевые модули аналитической платформы – сервисы обработки данных, BI-интерфейсы, аналитические API, нейросетевые архитектуры, а также взаимосвязи между слоями и параметрами. Элементами являются узлы аналитической сети: BI-сервисы, ML-сервисы, а также нейроны, признаки и связи между блоками модели. Связями являются взаимодействия BI-сервисов и ML-алгоритмов, связи между слоями нейросетей, весовые ко-

эффициенты и зависимости между признаками. Границы системы формируются на уровне интеграции в бизнес-процессы и определяются охватом признаков и пределов сети. Средой являются внешние информационные системы (BI, CRM, ERP), потоки данных и интеграционные платформы. Идентификаторы включают адреса узлов BI-сети, коды признаков и веса связей между элементами.

В рамках генетико-эволюционного подхода подсистемами являются версии аналитических модулей, этапы развития аналитики от ручной обработки к ML и AutoML, а также этапы генерации и оптимизации моделей. Элементами выступают настройки фильтров, параметры моделей, логи событий, архитектурные изменения и гиперпараметры. Связи представляют собой эволюционные изменения между модулями и их версиями, переходы между архитектурами и сохраненные состояния. Границы определяются версиями моделей, зонами экспериментов и стабильными рабочими конфигурациями, а также фазовыми границами жизненного цикла модели. Среда включает конкурентные платформы, требования заказчиков и контексты применения моделей. В качестве идентификаторов используются версии дашбордов и аналитических сценариев, коды архитектур и значения гиперпараметров.

Согласно онтологическому подходу, подсистемами выступают классы сущностей аналитической системы: анализ, отчеты, модели, ресурсы, пользователи, а также онтология объектов – модель, данные, метрики, задачи и алгоритмы. Элементами являются конкретные понятия, такие как «пользовательский запрос», «отчет», «анализ», а также сущности – «модель», «задача», «гиперпараметр», «обучающая выборка». Связи представлены семантическими отношениями между анализом, отчетами и источниками данных, а также логическими связями «использует», «порождает», «зависит от». Границы системы определяются рамками понятий, включенных в терминологию аналитики, а также онтологией задач и объектов. Средой являются домены знаний, внешние классификации, бизнес-онтологии, базы знаний и графы понятий. Идентификаторами служат URI аналитических сущностей, семантические теги, URI моделей и онтологические идентификаторы.

Выделенные в разных подходах составляющие аналитической цифровой платформы позволяют проектировать их на основании или уже существующих цифровых платформ, или на основании проведенных исследований в области машинного обучения.

Проектирование архитектуры цифровой аналитической платформы

В качестве примера спроектируем аналитическую цифровую платформу на основе исследований [20, 21] об эффективности сельскохозяйственных организаций. В них рассматриваются возможности и результаты применения метода опорных векторов для анализа факторов, влияющих на прибыльность сельскохозяйственных организаций. В первой работе был проведен анализ факторов прибыльности сельхозорганизаций Нижегородской области за период 2007–2017 гг. Авторы применили модифицированный алгоритм рекурсивного исключения признаков (MSVM-RFE) для отбора наиболее информативных переменных и построили SVM-модели с различными типами ядер. Основное внимание уделено сопоставлению результатов моделей по годам, что позволило проследить изменение значимости факторов во времени и построить динамический профиль ключевых характеристик, влияющих на финансовые показатели организаций. Во второй статье акцент был смещен в сторону дифференцированного анализа прибыльности с учетом специализации организаций по видам производимой продукции. Исследование расширено за счет построения SVM-моделей для подгрупп предприятий (зерновые, овощи, рапс, лен и др.), при этом для каждой группы выделялись индивидуальные наборы значимых факторов.

На основе этого был разработан проект интеллектуальной системы, предназначенной для поддержки принятия решений в аграрной сфере на основе систематического анализа статистических данных с применением методов машинного обучения. Основной целью этой цифровой аналитической платформы является не просто сбор и хранение информации о сельскохозяйственных организациях, а трансформация данных в знания, способные выявлять ключевые закономерности, определяющие эффективность деятельности предприятий. В центре платформы находится аналитическое ядро, построенное на методе опорных векторов и его модификациях, что позволяет решать задачи классификации и прогнозирования рентабельности организаций, а также формировать динамические профили значимых факторов с учетом отраслевой и продуктовой специализации. Рассмотрим далее основные особенности ее архитектуры с точки зрения разных подходов.

С точки зрения функционального подхода, в состав подсистем аналитической цифровой платформы входят модули:

- агрегации и предобработки данных (обеспечивает сбор, очистку, нормализацию и структурирование статистических данных о сельскохозяйственных организациях);

- отбора признаков (реализует алгоритмы интеллектуального отбора значимых факторов на основе метода рекурсивного исключения признаков и формирования рейтингов по их влиянию на прибыльность);

- построения моделей (отвечает за формирование классификационных и прогнозных моделей с использованием метода опорных векторов и его модификаций);

- дифференцированной аналитики (обеспечивает построение отдельных аналитических сценариев для подгрупп организаций с различной производственной специализацией);

- динамического анализа факторов (анализирует изменение значимости факторов во времени);

- визуализации (предоставляет результаты в виде интерактивных диаграмм, карт и графиков);

- формирования управленческих рекомендаций (интерпретирует аналитические результаты и трансформирует их в прикладные решения);

- сценарного прогнозирования (моделирует возможные изменения рентабельности при варьировании управляемых факторов).

Элементами системы являются конкретные функции и процедуры, реализуемые в рамках каждой подсистемы: фильтрация и нормализация показателей; расчет значений признаков; вычисление важности факторов; построение гиперплоскости разделения классов; оценка точности классификации, визуальное представление значений метрик; генерация отчетных форм; механизмы генерации сценариев и алгоритмы формирования прогнозов. Эти элементы представляют собой атомарные операционные единицы, обеспечивающие реализацию функций на каждом этапе аналитического цикла.

Границы системы определяются рамками аналитических задач, которые платформа способна решать. Это, в первую очередь, задачи оценки рентабельности, анализа факторов эффективности и прогнозирования финансовых результатов организаций аграрного сектора. За пределами системы остаются процессы непосредственного управления производством, нормативно-правовое регулирование и внешняя бухгалтерская отчетность – они рассматриваются как внешние источники данных или области применения результатов анализа.

Средой функционирования платформы являются внешние источники данных (статистические базы, отраслевые реестры, корпоративные информационные системы), вычислительная инфраструктура (серверы, облачные сервисы, ML-платформы), а также профессиональные пользователи (аналитики, управленцы, научные сотрудники), взаимодействующие с платформой через интерфейсные панели, API или отчетные модули. Эта среда оказывает

влияние на полноту данных, параметры моделей и применимость аналитических сценариев.

С точки зрения структурного подхода, к основным структурным подсистемам аналитической платформы относятся модули:

- сбора и хранения данных (реализует интерфейсы подключения к источникам и формирует централизованное хранилище данных);
- обработки и трансформации (включает структурирование, очистку и агрегирование данных);
- вычислений (выполняет математическую обработку, обучение моделей и расчет прогнозов);
- визуализации (представляет результаты в визуально интерпретируемой форме);
- управления конфигурацией (обеспечивает настройки моделей, управление параметрами и доступами);
- обмена с внешними системами (API-интерфейсы, интеграционные шлюзы).

Границы системы в структурном аспекте определяются архитектурными слоями – нижний уровень хранения данных, уровень обработки, уровень моделей, визуализации и внешнего взаимодействия. Границы также устанавливаются между внутренними компонентами и внешней ИТ-инфраструктурой, включая регламент подключения сторонних источников и ограничения на передачу данных.

Среда функционирования описывается как совокупность технических и программных условий, в которых система выполняет свои функции. Это вычислительные ресурсы (серверы, облачные контейнеры), системы управления данными, внешние цифровые платформы, с которыми осуществляется обмен. Среда влияет на устойчивость архитектуры и производительность выполнения задач.

С точки зрения объектно-ориентированного подхода, основу платформы составляют классы объектов, отражающих ключевые сущности аналитической системы: объект данных (содержит структуру набора данных, метаописания, источники), объект модели (включает тип модели, параметры, методы обучения и прогнозирования), объект анализа (представляет собой аналитический сценарий с настройками и логикой исполнения), объект отчета (содержит параметры визуализации, структуру отчетных форм и связанные метрики), объект пользователя (описывает роль, права доступа, историю действий), объект метрики (представляет собой измеритель точности, важности или эффективности модели).

Элементы системы в данном подходе – это конкретные экземпляры объектов: набор данных за 2017 г., SVM-модель (реальная) с RBF-ядром и параметрами, отчет по организации с определенным

уровнем рентабельности, сеанс аналитического сценария. Каждый элемент обладает собственным идентификатором и атрибутами, хранящими параметры состояния.

С точки зрения кибернетического подхода, аналитическая цифровая платформа включает управляющие подсистемы, которые обеспечивают корректировку параметров моделей, управление выбором признаков, переключение аналитических сценариев, а также адаптацию к изменению внешней среды. Эти подсистемы функционируют на основе получаемой информации о текущем состоянии моделей, метрик точности, ошибок классификации и динамике рентабельности организаций. Роль регуляторов выполняют алгоритмы оптимизации, функции автоматического подбора параметров и механизмы оценки качества результатов.

Элементами системы выступают сенсоры и контроллеры. Сенсоры – это метрики, фиксирующие текущее состояние модели: точность классификации, чувствительность к признакам, стабильность прогнозов. Контроллеры – алгоритмы, изменяющие параметры модели, инициирующие переобучение, изменяющие сценарии анализа в зависимости от обратной связи.

Связи в системе представляют собой петли обратной связи: информация о состоянии модели передается в управляющий модуль, который принимает решение о корректировке параметров или пересчете результатов. Обратная связь обеспечивает самонастройку платформы и адаптацию к изменениям в данных и во внешней среде.

Границы системы определяются контуром управления: только те компоненты, которые входят в цикл анализа, прогнозирования и корректировки, считаются частью системы. Внешняя среда, включая источники данных, потребителей информации и инфраструктуру, является объектом воздействия или влияния, но не входит в управляющий контур.

Среда системы включает в себя входные сигналы (данные, события, ошибки), выходные воздействия (рекомендации, отчеты, прогнозы), а также помехи (неполные данные, шум, искажения), к которым система должна быть устойчива. Именно адаптация к среде является основной функцией кибернетической архитектуры.

С точки зрения сетевого подхода, подсистемами являются технологические сегменты сети: вычислительный кластер для обучения моделей; аналитический слой, реализующий сценарии классификации и прогнозирования; слой визуализации с BI-интерфейсами и API-доступом; коммуникационные компоненты для взаимодействия между сервисами. Все подсистемы связаны через конкрет-

ные сетевые интерфейсы (REST API, gRPC), очереди сообщений (Kafka, RabbitMQ) или каналы передачи параметров и данных (JSON, Protobuf).

Границы системы определяются наличием зарегистрированных узлов внутри общей сетевой архитектуры. Например, все компоненты, развернутые в пределах единого кластера аналитики, составляют внутреннюю сеть; подключение внешних систем (например, статистической базы Минсельхоза) происходит через шлюз API и считается выходом за границы.

Среда включает внешние информационные узлы: базы данных Росстата, корпоративные ERP-системы, облачные сервисы хранения моделей, BI-платформы пользователей. Эти узлы передают данные во внутреннюю сеть платформы, где они обрабатываются по регламентированным маршрутам.

С точки зрения генетико-эволюционного подхода, архитектура аналитической платформы отражает последовательные стадии развития функциональности – от простейших модулей статистической отчетности до внедрения интеллектуальных ML-компонентов. Система состоит из технологических слоев, каждый из которых представляет собой этап эволюции. Например, слой ручной аналитики (2000–2010 гг.) реализуется в виде компонентов формирования стандартных отчетов и таблиц сводных показателей; слой автоматизированной аналитики (2010–2015 гг.) включает модули фильтрации, агрегации, расчета индикаторов; слой интеллектуального анализа (с 2015 г.) представлен SVM-моделями, сценарным прогнозированием и автоаналитикой.

Подсистемами являются блоки, соответствующие эволюционным этапам: подсистемы отчетных форм, статистической фильтрации, машинного обучения (SVM), анализа специализаций, динамики факторов, сценарного прогнозирования. Каждая подсистема имеет версию историю, которая отражает ее развитие: например, модуль SVM-модели версии 1.0 поддерживает только линейное ядро, версия 2.0 — RBF-ядро и кросс-валидацию.

Элементами являются конкретные версии компонентов: модель SVM_v1, визуализатор_v2.1, отчетный шаблон_2017, MSVM-RFE_v3.0. Эти элементы имеют дату внедрения, описание параметров, уровень зрелости (например, экспериментальный или промышленный). Архитектура учитывает их взаимосвязи и устаревание.

Связи описываются как линии наследования и трансформации: отчетный шаблон образован из предыдущей версии, компонент метрик точности мигрировал в новый модуль автооценки, SVM-модель адаптирована к новым признакам после обновления алгоритма отбора. Система хранит логи изменений и версии зависимостей.

Границы системы устанавливаются на основе стадий зрелости: ядро состоит из актуальных стабильных компонентов; периферия — из экспериментальных функций. Например, компонент прогностического анализа специализаций может быть частью экспериментального слоя и запускаться отдельно от основной аналитики.

Идентификаторы включают коды версий модулей (model_v2.3), метки эволюционного уровня (например, «legacy», «active», «deprecated»), лог изменений и истории использования конкретных моделей и сценариев.

С точки зрения онтологического подхода, аналитическая цифровая платформа строится как формализованная предметная модель, содержащая описание всех сущностей, процессов и отношений между ними в терминах онтологии.

Подсистемами являются онтологические классы верхнего уровня:

- DataEntity (описание структуры входных данных, их источников, типов и форматов);
- ModelEntity (описание всех типов моделей, включая SVM, их атрибутов, ядра, гиперпараметров, способов оценки)
- AnalysisScenario (сценарии применения моделей, критерии запуска);
- ReportEntity (формы представления аналитических выводов, структура отчетов, метрик и графиков);
- DecisionSupport (сущности, связанные с управленческими рекомендациями и влиянием анализа на действия пользователя).

Элементами являются экземпляры онтологических классов: конкретный набор данных за 2019 г. (DataInstance_2019), SVM-модель с RBF-ядром (ModelInstance_SVM_RBF), сценарий анализа рентабельности по специализации (Scenario_GrainFarms), отчет о точности модели (Report_F1score_Grain2020).

Границы системы определяются содержанием онтологии. Все, что описано как класс, атрибут или отношение, принадлежит системе. Все, что не описано, – внешняя среда. Например, если понятие «качество почв» не включено в онтологию, то аналитика по нему не может быть частью платформы.

Данный подход может быть применен к любой информационной системе, использующей машинное обучение в качестве основы аналитики; для этого необходимо рассмотрение машинное обучение с точки зрения системного анализа (таблица 2). На основе материала таблицы 2 можно разработать описание любой цифровой аналитической платформы с помощью разных подходов.

ТАБЛИЦА 2. Составляющие машинного обучения с точки зрения разных подходов системного анализа

TABLE 2. Components of Machine Learning from the Perspective of Different Systems Analysis Approaches

Подход	Подсистемы	Элементы	Связи	Границы системы	Среда системы	Идентификаторы
Функциональный	Функциональные блоки систем машинного обучения	Минимальные действия с данными	Связи между функциями	Разделение между этапами работы с данными	Все, что влияет на функциональность системы извне	Уникальные названия функций, шагов, идентификаторы задач обучения и прогнозирования
Структурный	Архитектурные компоненты системы	Конкретные компоненты	Программные зависимости между компонентами системы	Границы между модулями	Инфраструктура	Версии модулей, маршруты передачи данных
Объектно-ориентированный	Классы объектов, соответствующих ключевым сущностям в машинном обучении	Объекты с конкретными характеристиками	Логические и программные связи между объектами	Область действия объектов	Сторонние библиотеки, объекты, участвующие в процессе обучения	Уникальные идентификаторы объектов (модели, выборки, отчеты)
Кибернетический	Подсистемы управления: алгоритмы	Сенсоры (измерители качества модели, например, точность или ошибка), регуляторы (алгоритмы корректировки параметров модели, адаптации скорости обучения)	Обратные связи	Область воздействия управляющих механизмов	Поведение модели в условиях нестабильных данных, неожиданных ситуаций, изменения требований	Идентификаторы управляющих алгоритмов
Сетевой	Сетевые структуры	Узлы	Связи между узлами	Границы архитектурной сети	Внешние потоки данных	Коды узлов, идентификаторы слоев
Генетико-эволюционный	Этапы развития модели	Параметры и характеристики моделей	Наследственные связи между поколениями моделей	Разделение на стабильные и экспериментальные модули	Пользовательские потребности	Идентификаторы версий, коды изменений, конфигурационные параметры моделей
Онтологический	Классы понятий и сущностей	Онтологические сущности	Семантические отношения	Границы понятийной модели	Внешние модели знаний, базы понятий, другие онтологии	Формальные обозначения сущностей, их атрибутов и связей

Заключение

Проведенный анализ показал, что архитектура цифровых и аналитических платформ может быть рассмотрена с различных теоретико-системных позиций, каждая из которых позволяет выявить специфические аспекты структуры, функционирования и взаимодействия элементов. Сопоставление подходов системного анализа с реальными компонентами архитектур промышленного IoT, платежных, научных и аналитических платформ позволяет утверждать, что универсального решения не существует – выбор архитектурной парадигмы должен определяться задачами, типом данных, отраслевыми условиями и масштабами экосистемы. Особенно важным становится междисциплинарный подход, интегрирующий инженерные, когнитивные и организационные перспективы.

Новизна исследования заключается в одновременном рассмотрении архитектур цифровых платформ и архитектур систем машинного обучения в рамках единой системной методологии. Это позволяет синтезировать целостную модель аналитической цифровой платформы, в которой архитектурные решения по хранению, обработке, анализу и визуализации данных согласуются с типами решаемых задач, механизмами адаптации и управляемости системы. Пример платформы поддержки принятия решений в аграрной сфере демонстрирует возможность практической реализации системного подхода на стыке нескольких научных парадигм – функциональной, объектно-ориентированной, эволюционной и онтологической.

Будущие исследования могут быть направлены на уточнение онтологий аналитических платформ в конкретных предметных областях, разработку

формальных метамodelей архитектур на основе системных подходов, а также создание инструментов автоматического сопоставления бизнес-требований с архитектурными решениями. Актуальной задачей остается интеграция платформенных решений с инструментами explainable AI, что требует дополнительных теоретических и приклад-

ных разработок на стыке онтологического и кибернетического подходов. Кроме того, перспективным направлением видится моделирование жизненного цикла аналитической платформы с учетом цифровой трансформации отраслей и эволюции требований пользователей.

Список источников

1. Arnold L., Jöhnk J., Vogt F., Urbach N. A Taxonomy of Industrial IoT Platforms' Architectural Features // *Proceedings of the 16th International Conference on Wirtschaftsinformatik "Innovation Through Information Systems. Volume III: A Collection of Latest Research on Management Issues"* (WI 2021, 9–11 March 2021). Lecture Notes in Information Systems and Organisation. Cham: Springer, 2021. Vol. 48. PP. 404–421. DOI:10.1007/978-3-030-86800-0_28
2. Diniz E.H., Siqueira E.S., van Heck E. Taxonomy of digital community currency platforms // *Information Technology for Development*. 2019. Vol. 25. Iss. 1. PP. 69–91. DOI:10.1080/02681102.2018.1485005
3. da Silva Neto V.J., Chiarini T. The Platformization of Science: Towards a Scientific Digital Platform Taxonomy // *Minerva*. 2023. Vol. 61. PP. 1–29. DOI:10.1007/s11024-022-09477-6. EDN:WXTASP
4. Blaschke M., Haki K., Aier S., Winter R. Taxonomy of Digital Platforms: a Platform Architecture Perspective // *Proceedings of the 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik* (Siegen, Germany, 24–27 February 2019). PP. 572–586.
5. Кутлиев Г., Бабаев И. Управление цифровой экономикой с помощью искусственного интеллекта: новый уровень эффективности // *Символ науки: международный научный журнал*. 2024. Т. 1. № 10-2. С. 127–128. EDN:NVYVIN
6. Глинский В.В., Серга Л.К. Об измерении результатов деятельности цифровой экономики на региональном уровне // *Вестник НГУЭУ*. 2022. № 4. С. 219–233. DOI:10.34020/2073-6495-2022-4-219-233. EDN:AMMOOW
7. Архипова З.В. Концепция информационной системы мониторинга уровня развития цифровой экономики // *Baikal Research Journal*. 2018. Т. 9. № 3. С. 8. DOI:10.17150/2411-6262.2018.9(3).8. EDN:TUXJWW
8. Ивинская Е.Ю., Шевко Н.Р., Хисамутдинова Э.Н. Оценка уровня развития информационной экономики на основе учета состояния объектов цифровой инфраструктуры // *Горизонты экономики*. 2020. № 6(59). С. 26–31. EDN:CHVVS
9. Криштаносов В.Б. Угрозы и риски цифровой экономики на секторальном уровне // *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*. 2022. № 1(256). С. 28–52. DOI:10.52065/2520-6877-2022-256-1-28-52. EDN:ZOERMC
10. Якимова Т.Б. Цифровая экономика и ее влияние на уровень и качество жизни населения // *Russian Economic Bulletin*. 2022. Т. 5. № 1. С. 245–250. EDN:WYCFMH
11. Viola N., Corpino S., Fioriti M., Stesina F. Functional Analysis in Systems Engineering: Methodology and Applications // In: Cogan B. (ed.) *Systems Engineering – Practice and Theory*. InTech, 2012. PP. 71–96. DOI:10.5772/34556
12. Cutts G. Structured systems analysis and design methodology. 1988. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108576776> (Accessed 11.09.2025)
13. Dennis A., Wixom B., Tegarden D. *Systems Analysis and Design. An Object-Oriented Approach with UML*. Wiley, 2015.
14. Kharchenko V., Dotsenko S., Ponochoynyi Yu., Illiashenko O. Cybernetic approach to developing resilient systems: Concept, models and application // *Information & Security*. 2020. Vol. 47. Iss. 1. PP. 77–90. DOI:10.11610/isij.4705. EDN:SFHPWS
15. Anderson B.D.O., Vongpanitlerd S. *Network Analysis and Synthesis: A Modern Systems Theory Approach*. Courier Corporation, 2013.
16. Majone G. *Applied Systems Analysis: A Genetic Approach*. 1980.
17. Rosemann M., Green P., Indulska M. A Reference Methodology for Conducting Ontological Analyses // *Proceedings of the 23rd International Conference on Conceptual Modeling* (Shanghai, China, 8–12 November 2004). Berlin; Heidelberg: Springer, 2004. PP. 110–121. DOI:10.1007/978-3-540-30464-7_10
18. Derave T., Sales T.P., Gailly F., Poels G. Understanding Digital Marketplace Business Models: An Ontology Approach // *Proceedings of workshops co-organized with the 14th IFIP WG 8.1 Working Conference on the Practice of Enterprise Modelling (PoEM 2021, Riga, Latvia, 24 November 2021)*. CEUR, 2021. Vol. 3031. PP. 15–26.
19. Armstrong E.M., Bourassa M.A., Cram T.A., DeBellis M., Elya J., Greguska III F.R., et al. An Integrated Data Analytics Platform // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. P. 354. DOI:10.3389/fmars.2019.00354
20. Черемухин А.Д., Шамин А.А., Колбанев М.О., Цехановский В.В. Эффективность применения метода SVM в задаче определения рентабельных организаций // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2023. Т. 16. № 4. С. 30–45. DOI:10.32603/2071-8985-2023-16-4-30-45. EDN:BFFLWR
21. Черемухин А.Д., Шамин А.А., Колбанёв М.О., Цехановский В.В. Анализ результативности метода опорных векторов при статистической обработке больших данных // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2021. № 2. С. 58–68. EDN:YKOARK

References

1. Arnold L., Jöhnk J., Vogt F., Urbach N. A Taxonomy of Industrial IoT Platforms' Architectural Features. *Proceedings of the 16th International Conference on Wirtschaftsinformatik "Innovation Through Information Systems. Volume III: A Collection of Latest Research on Management Issues"*, WI 2021, 9–11 March 2021. Lecture Notes in Information Systems and Organisation, vol.48. Cham: Springer; 2021. p.404–421. DOI:10.1007/978-3-030-86800-0_28
2. Diniz E.H., Siqueira E.S., van Heck E. Taxonomy of digital community currency platforms. *Information Technology for Development*. 2019;25(1):69–91. DOI:10.1080/02681102.2018.1485005
3. da Silva Neto V.J., Chiarini T. The Platformization of Science: Towards a Scientific Digital Platform Taxonomy. *Minerva*. 2023;61:1–29. DOI:10.1007/s11024-022-09477-6. EDN:WXTASP
4. Blaschke M., Haki K., Aier S., Winter R. Taxonomy of Digital Platforms: a Platform Architecture Perspective. *Proceedings of*

the 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik, 24–27 February 2019, Siegen, Germany. p.572–586.

5. Kutliev G., Babaev I. Managing the Digital Economy with Artificial Intelligence: A New Level of Efficiency. *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*. 2024;1(10-2):127–128. (in Russ.) EDN:NVYVIN
6. Glinskiy V.V., Serga L.K. On measurement of the results of the activities of digital economy at the regional level. *Vestnik NSUEM*. 2022;4:219–233. (in Russ.) DOI:10.34020/2073-6495-2022-4-219-233. EDN AMMOOW
7. Arkhipova Z.V. The concept of information system for monitoring digital economy development level. *Baikal Research Journal*. 2018;9(3):8. (in Russ.) DOI:10.17150/2411-6262.2018.9(3).8. EDN:TUXJWW
8. Ivinskaya E.Yu., Shevko N.R., Khisamutdinova E.N. The Assessment of the Level of development of the Information Economy Based on the Status of Digital Infrastructure Objects. *Gorizonty ekonomiki*. 2020;6(59):26–31. (in Russ.) EDN:CHVVS
9. Kryshatanosay V.B. Threats and risks of digital economy at the sectoral level. *Trudy BGTU. Seriya 5, Ekonomika i upravlenie*. 2022;1(256):28–52. (in Russ.) DOI:10.52065/2520-6877-2022-256-1-28-52. EDN:ZOERMC
10. Yakimova T.B. Digital economy and its impact on the level and quality of life population. *Russian Economic Bulletin*. 2022;5(1):245–250. (in Russ.) EDN:WYCFMH
11. Viola N., Corpino S., Fioriti M., Stesina F. Functional Analysis in Systems Engineering: Methodology and Applications. In: *Cogan B. (ed.) Systems Engineering – Practice and Theory*. InTech; 2012. p.71–96. DOI:10.5772/34556
12. Cutts G. *Structured systems analysis and design methodology*. 1988. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108576776> [Accessed 11.09.20205]
13. Dennis A., Wixom B., Tegarden D. *Systems Analysis and Design. An Object-Oriented Approach with UML*. Wiley; 2015.
14. Kharchenko V., Dotsenko S., Ponochoyni Yu., Illiashenko O. Cybernetic approach to developing resilient systems: Concept, models and application. *Information & Security*. 2020;47(1):77–90. DOI:10.11610/isij.4705. EDN:SFHPWS
15. Anderson B.D.O., Vongpanitlerd S. *Network Analysis and Synthesis: A Modern Systems Theory Approach*. Courier Corporation; 2013.
16. Majone G. *Applied Systems Analysis: A Genetic Approach*. 1980.
17. Rosemann M., Green P., Indulska M. A Reference Methodology for Conducting Ontological Analyses. *Proceedings of the 23rd International Conference on Conceptual Modeling, 8–12 November 2004, Shanghai, China*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2004. p.110–121. DOI:10.1007/978-3-540-30464-7_10
18. Derave T., Sales T.P., Gailly F., Poels G. Understanding Digital Marketplace Business Models: An Ontology Approach. *Proceedings of workshops co-organized with the 14th IFIP WG 8.1 Working Conference on the Practice of Enterprise Modelling, PoEM 2021, 24 November 2021, Riga, Latvia, vol.3031*. CEUR; 2021. p.15–26.
19. Armstrong E.M., Bourassa M.A., Cram T.A., DeBellis M., Elya J., Greguska III F.R., et al. An Integrated Data Analytics Platform. *Frontiers in Marine Science*. 2019;6:354. DOI:10.3389/fmars.2019.00354
20. Cheremukhin A.D., Shamin A.A., Kolbanov M.O., Tsekhanovskii V.V. The Effectiveness of the SVM Method in the Task of Determining Profitable Organizations. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2023;16(4):30–45. (in Russ.) DOI:10.32603/2071-8985-2023-16-4-30-45. EDN BFFLWR
21. Cheremukhin A.D., Shamin A.A., Kolbanov M.O., Tsekhanovskii V.V. Using SVM to Study Dynamics of Factors Affecting the Profitability of Agricultural Organizations. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2021;2:58–68. (in Russ.) EDN:YKOARK

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 29.07.2025.

The article was submitted 11.06.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 29.07.2025.

Информация об авторах:

ШАМИН Алексей Анатольевич	кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета  https://orcid.org/0000-0003-4138-6256
КОЛБАНЕВ Михаил Олегович	доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  https://orcid.org/0000-0003-4825-6972
ЧЕРЕМУХИН Артем Дмитриевич	кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математика и вычислительная техника» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета  https://orcid.org/0000-0003-4076-5916

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

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

**2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения**

**2.2.14 – Антенны, СВЧ–устройства
и их технологии**

**2.2.15 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций**

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Review research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-42-59>

EDN:WXEIH5



LDPC and Polar Codes in 6G: A Comparative Study and Unified Frameworks

Weijia Zhang , zhangweijia@ieee.org

Talgat R. Gazizov, talgat.r.gazizov@tusur.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, 634000, Russian Federation

Annotation

Relevance. As sixth-generation (6G) wireless systems pursue extreme requirements in throughput, latency, reliability, and adaptability, the design of channel coding schemes becomes increasingly critical. This paper presents a comprehensive comparison between Low-Density Parity-Check (LDPC) codes and Polar codes, the two most promising channel coding candidates for 6G. We analyze their respective strengths across key metrics including data throughput, error-correction capability, decoding complexity, hardware implementation, and adaptability to dynamic communication scenarios. Furthermore, we explore recent advances in unified channel coding frameworks, including generalized LDPC with Polar-like components (GLDPC-PC) and artificial intelligence (AI)-assisted decoders, which aim to bridge the performance gap across diverse 6G scenarios.

Purpose. This paper aims to provide a systematic and measurable comparison of LDPC and Polar codes for 6G, while also examining the feasibility of unified coding frameworks to bridge their performance gaps.

Methods used. This study employs a systematic literature review. The analysis first evaluates LDPC and Polar codes against four key metrics: data throughput, error-correction capability, decoding complexity and hardware implementation, and flexibility. It then examines advancements in long- and short-block code design and unified frameworks. The comparison is substantiated by a quantitative analysis of documented performance data.

Results. LDPC codes demonstrate strong hardware scalability and parallelism, while Polar codes excel in short-packet error correction. Unified approaches integrate their advantages, enhancing adaptability to diverse scenarios.

Novelty. Unlike prior works with fragmented analyses, this study combines comparative evaluation with an exploration of unified frameworks, providing an integrated perspective.

Theoretical significance. The results enrich theoretical understanding of 6G coding trade-offs. The paper offers a guidance for researchers and standardization bodies in designing future coding strategies.

Practical significance. The practical significance of the work lies in the fact that the conducted comparative study of LDPC and Polar codes enables a well-founded selection of channel coding schemes for various 6G communication scenarios. The obtained results can be used in the design of 6G communication systems to optimize the choice between codes: Polar codes are suitable for short packets requiring low latency and high energy efficiency, while LDPC codes (particularly SC-LDPC) are ideal for long codes where hardware scalability and parallelism are critical. The results are also applicable to the development of unified decoders and adaptive systems capable of dynamically switching between schemes, which enhances the flexibility and efficiency of future telecommunication infrastructures.

Keywords: 6G, channel coding, LDPC codes, Polar codes

Funding: The research was supported by RSF (project 25-29-00139), <https://rscf.ru/roject/25-29-00139> in TUSUR.

For citation: Zhang W., Gazizov T.R. LDPC and Polar Codes in 6G: A Comparative Study and Unified Frameworks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):42–59. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-42-59. EDN:WXEIH5

Обзорная статья

УДК 004.7+004.738.2: 004.738.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-42-59>

EDN:WXEIHNS

LDPC и полярные коды в 6G: сравнительное исследование и унифицированные фреймворки

Вэйцзя Чжан ✉, zhangweijia@ieee.org

Тальгат Рашитович Газизов, talgat.r.gazizov@tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634000, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. По мере того, как беспроводные системы 6G стремятся удовлетворить экстремальные требования к пропускной способности, задержке, надежности и адаптивности, проектирование схем канального кодирования приобретает все более критическое значение. В данной статье представлен всесторонний сравнительный анализ кодов с малой плотностью проверок на четность (LDPC) и полярных кодов – двух наиболее перспективных кандидатов на роль канальных кодов для 6G. Рассматриваются их сильные стороны по ключевым метрикам, включая пропускную способность передачи данных, помехоустойчивость, сложность декодирования, аппаратную реализацию и адаптивность к динамичным условиям связи. Кроме того, обсуждаются современные подходы к созданию унифицированных фреймворков канального кодирования, включая обобщенные коды LDPC с компонентами, аналогичными полярным, и декодеры, основанные на искусственном интеллекте, направленные на сокращение разрыва в производительности в различных сценариях 6G. **Целью** данной работы является проведение систематического и измеримого сравнения LDPC и полярных кодов для 6G, а также изучение возможностей унифицированных кодовых структур для преодоления их разрыва в производительности.

Используемые методы. В данном исследовании применяется систематический обзор литературы. Анализ начинается с оценки кодов LDPC и полярных кодов по четырем ключевым метрикам: пропускная способность, помехоустойчивость, сложность декодирования и аппаратная реализация, а также гибкость. Затем рассматриваются достижения в области проектирования длинных и коротких блочных кодов, а также унифицированные фреймворки. Сравнение подкреплено количественным анализом документированных данных о производительности.

Результаты. Коды LDPC демонстрируют высокую масштабируемость и возможность параллельной аппаратной реализации, тогда как полярные коды показывают преимущества в коррекции ошибок при коротких блоках. Унифицированные подходы позволяют объединить их сильные стороны, повышая адаптивность к различным сценариям.

Новизна. В отличие от предыдущих работ с фрагментарным анализом, данное исследование объединяет сравнительную оценку с рассмотрением унифицированных подходов, формируя целостное представление.

Теоретическая значимость. Результаты обогащают теоретическое понимание компромиссов при выборе кодов для 6G и расширяют знания о перспективах их развития. Работа предлагает прикладные ориентиры для исследователей и органов стандартизации при разработке стратегий построения кодовых схем следующего поколения.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем связи 6G для оптимизации выбора между кодами: полярные коды – для коротких пакетов с требованиями низкой задержки и высокой энергоэффективности; LDPC (в частности, SC-LDPC) – для длинных кодов, где критичны аппаратная масштабируемость и распараллеливание. Результаты также применимы для разработки унифицированных декодеров и адаптивных систем, динамически переключающихся между схемами, что повышает гибкость и эффективность телекоммуникационных инфраструктур.

Ключевые слова: 6G, канальное кодирование, LDPC-коды, полярные коды

Финансирование: Исследование поддержано РФФИ (проект 25-29-00139), <https://rscf.ru/project/25-29-00139> в ТУСУРе.

Ссылка для цитирования: Чжан В., Газизов Т.П. A Comparative Study and Unified Frameworks // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 42–59. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-42-59. EDN:WXEIH8

Introduction

Channel coding adds structured redundancy to transmitted signals, enabling robust error correction against noise, interference, and channel fading, thereby ensuring data integrity at the receiver side [1]. It is fundamental to maintaining both transmission reliability and user experience in modern wireless communication systems. Compared with the fifth-generation (5G) networks, sixth-generation (6G) communications aim to deliver significantly higher throughput, ultra-low latency, high accuracy and flexibility [2, 3]. These ambitious goals impose unprecedented demands on forward error correction (FEC) schemes in terms of decoding efficiency, flexibility, and hardware scalability.

Current mainstream channel coding techniques include Turbo codes, Low-Density Parity-Check (LDPC) codes, and Polar codes. Turbo codes provide excellent error correction performance but depend on iterative decoding with limited parallelism capabilities, resulting in high latency and reduced scalability. These characteristics make them less favorable for core 6G scenarios that demand ultra-low latency and extremely high data throughput [4, 5]. In contrast, LDPC and Polar codes have already been adopted in global wireless standards due to their capacity-approaching performance and favorable decoding characteristics [1]. Both are theoretically capable of approaching the Shannon limit and are better aligned with the stringent KPIs of 6G communications. However, given the complexity and diversity of future 6G scenarios, there remains a critical need for comprehensive evaluation and comparative analysis of these two coding paradigms to guide optimal coding scheme selection.

Although several studies have provided comprehensive analyses of channel coding schemes for 6G [6–8], most remain limited to qualitative descriptions of the fundamental characteristics and trade-offs of LDPC and Polar codes. While some recent works have highlighted individual advancements in these codes, a systematic comparison under key 6G performance metrics is still lacking – particularly regarding their adaptability to both long and short block length scenarios. Furthermore, the feasibility and design path of a unified channel coding framework for 6G have yet to be thoroughly investigated.

This paper presents a systematic and in-depth analysis of the recent developments of LDPC and Polar codes in the context of 6G. We begin by examining their fundamental code structures and decoding architectures. Then we compare their advancements across 4 key dimensions: data throughput, error correction performance, decoding complexity and hardware implementation, and flexibility and adaptability. Furthermore, we analyzed the development trends of long and short

block codes in 6G communication systems and summarized the current key technological approaches and representative research achievements. Finally, we explore the evolution and representative approaches of unified channel coding frameworks. Our objective is to clarify the design trade-offs and potential synergies between these two coding paradigms, providing valuable insights for the design of next-generation channel coding strategies in 6G.

Fundamentals of LDPC and Polar Codes

LDPC codes, as one of the FEC codes with excellent performance, are also a hot spot area for 6G channel coding. LDPC codes are a class of linear block codes with sparse check matrices, which were first proposed in [9]. The LDPC code can be determined by the check matrix $\mathbf{H}$, which is a sparse matrix of size $m \times n$ where m is the length of the check bits, n is the length of the LDPC code, the length of the information bits is $k = n - m$, and the code rate is $R = k / n$. The structure of LDPC codes is flexible, primarily determined by the design of the $\mathbf{H}$ matrix. By adjusting the number of rows and columns in the $\mathbf{H}$ matrix, both the code rate and code length can be flexibly controlled. The construction methods of the LDPC code's $\mathbf{H}$ matrix can be broadly categorized into random construction and structured construction, each with its own advantages and disadvantages. $\mathbf{H}$ matrices generated through random construction can theoretically approach the Shannon limit, but their irregular structure leads to complex hardware implementation and makes it difficult to optimize the decoder for parallel processing [9, 10]. In contrast, $\mathbf{H}$ matrices generated through structured construction are hardware friendly and support efficient parallel decoding, but their performance is inferior to that of optimally constructed random LDPC codes [11, 12].

In order to more intuitively show the sparse connection relationship between the information bit (variable node) and the check bit (check node) in the $\mathbf{H}$ matrix, and to identify the local structural features of the $\mathbf{H}$ matrix, the $\mathbf{H}$ matrix can be represented by a Tanner graph [13]. The 6 columns and 4 rows check matrix $\mathbf{H}$ of a LDPC code, along with its corresponding Tanner graph is illustrated in Fig. 1. In the Tanner graph, a closed loop starting from a node and returning to the starting point after passing through several edges without repeating the path is called a cycle. The red line in Fig. 1 shows a circle with a girth of 6. The girth will directly affect the performance of the LDPC codes decoding algorithms. Short cycles limit the independence between nodes, causing local errors to propagate rapidly through the cyclic structure. This causes the BER of the decoding algorithm to stagnate at high SNR, resulting in an error floor. To improve the reliability and efficiency of LDPC

codes, designers commonly avoid 4-cycles and target girth ≥ 6 ; in modern standards such as 5G NR and Wi-Fi 6 [14].

LDPC codes decoding relies on an iterative process that involves exchanging messages between the VNs

and CNs in the Tanner graph [13]. At current, soft decision algorithm is the mainstream algorithm of LDPC codes decoding algorithm, and the BP decoding algorithm, which is closest to the channel capacity, is the soft decision decoding algorithm [15].

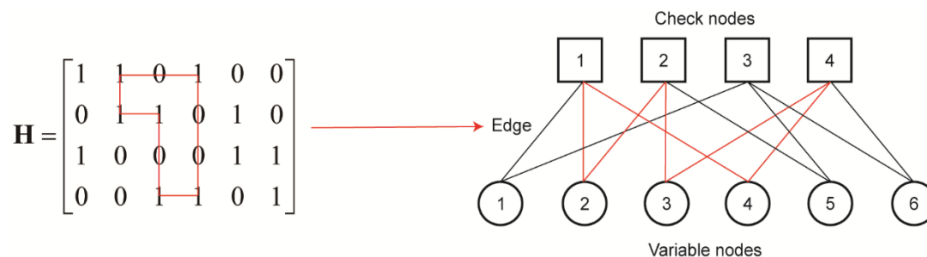


Fig. 1. H Matrix of LDPC Code with 6 Columns and 4 Rows and the Corresponding Tanner Graph

The soft decision algorithm is based on probability theory in which the message passed is the probability value associated with the occurrence of a particular bit. Fig. 2 illustrates a typical computational model of a soft verdict decoding algorithm, where the original posteriori probabilities are first input to the VNs, and then the information is iterated between the VNs and CNs. Soft decision decoding algorithms also include LLR-BP, MS, and so on.

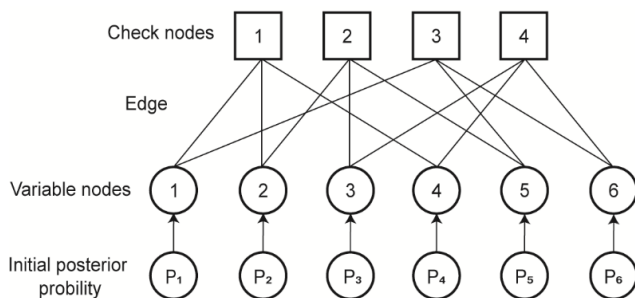


Fig. 2. Soft Decision Algorithm Typical Computational Model

As the length of LDPC codes increases, the parity check matrix becomes larger while maintaining low density, resulting in longer cycles in the Tanner graph and reducing the impact of short cycles. Meanwhile, in the sparse matrix of long LDPC codes, the large number of nodes and sparse connections allow messages to propagate through multiple independent paths during the iterative process. The independent information from these paths complements each other, enabling the decoding algorithm to cross verify errors from multiple perspectives in each iteration, leading to significantly improved error correction performance [9, 16]. Therefore, LDPC codes are particularly well suited for transmission schemes involving long code blocks. For instance, 5G NR supports a maximum code length of up to 8448 bits, which provides favorable conditions for LDPC codes to achieve highly parallel decoding and near Shannon limit performance, allowing their advantages to be fully realized (<https://portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTdoc>).

Polar codes have been rigorously proven to achieve the Shannon capacity. The core structure of Polar codes is processed by channel polarization [17]. Channel polarization includes two parts: channel merging and channel decomposition. When the number of merged channels tends to infinity, polarization phenomenon will occur: one part of the channel will tend to a noiseless channel, and the other part will tend to a full-noise channel. The transmission rate of the noiseless channel will reach the channel capacity, while the transmission rate of the full noise channel tends to 0. Fig. 3 briefly illustrates the channel polarization process of Polar codes. The polarized subchannels are sorted by reliability, where the high reliability subchannels (lower noise) are used for transmitting user information as information bits; while the low reliability subchannels (higher noise) are designated as frozen bits, transmitting a predetermined value (usually 0) to aid in decoding. In a Polar code of length N , K of the most reliable subchannels are selected as information bits, while the remaining $N-K$ are frozen. This leads to a code rate of $R = K / N$.

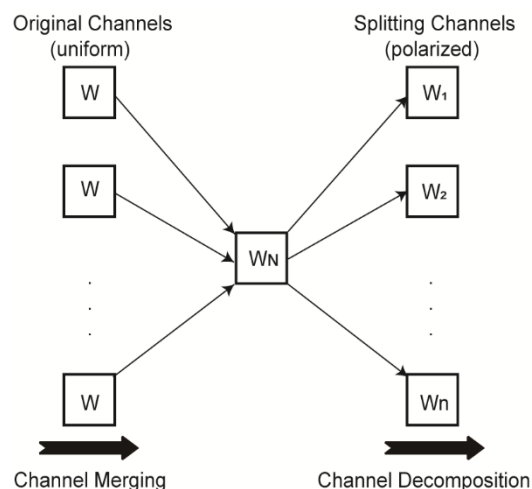


Fig. 3. Polar Codes Channel Polarization Process

The generator matrix of Polar codes is constructed recursively using the Kronecker product. For a code

length $N = 2^n$ (where $n \geq 1$), the core formula of the generator matrix is given as shown in (1) where $\mathbf{B}_N$ represents the bit reversal permutation matrix, which is used to reorder the input bits by performing a bit reversal operation on their indices.

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N \cdot \mathbf{G}_2^{\otimes n}, N = 2^n, \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Due to the inherent characteristics of channel polarization and the recursive construction of the generator matrix, the code length N of Polar codes must be 2^n . As a result, Polar codes are less flexible in terms of code length compared to LDPC codes. In practical applications, shortening or puncturing techniques can be employed to adapt Polar codes to lengths that are not 2^n , but this typically results in performance degradation. The recursive construction of Polar codes makes the reliability of each sub-channel dependent on the decoding results of preceding channels. Since channel polarization is inherently a sequential process, the successive cancellation (SC) decoding algorithm becomes the most natural and efficient choice [17]. The SC decoding algorithm can be abstractly represented as a binary tree traversal. Fig. 4 illustrates the decoding tree for a Polar code ($N = 8, K = 4$). The tree contains of $1 + \log_2 N$ layers (including the root layer), and each layer i has 2^i nodes. Information bits and frozen bits are denoted by black and white circles. For each internal node in the tree, if both of its descendants have the same color, the node is marked with that color; otherwise, it is marked in gray. SC decoding leverages the information from already decoded bits to assist in making decisions for subsequent bits. It is simple to implement and well-suited for low-power scenarios. However, its main drawback lies in error propagation in short code blocks. Due to insufficient polarization of short code blocks, the reliability gap between channels is small, making it difficult for SC to effectively distinguish between good and bad channels. Once an error occurs, it tends to propagate along the decoding path, leading to further decoding failures. As a result, the BER tends to stagnate in the high SNR region.

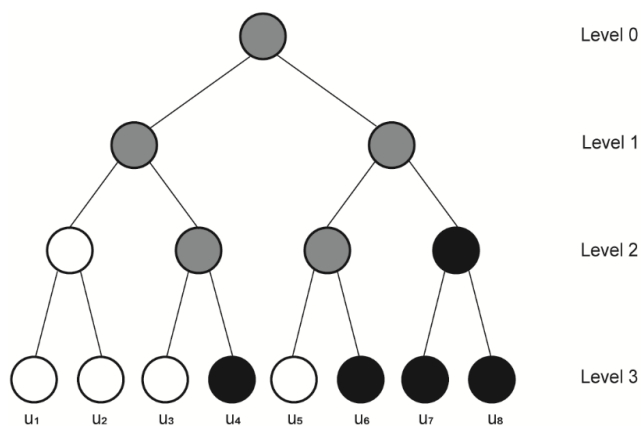


Fig. 4. Polar Code ($N = 8, K = 4$) Decoding Tree

In order to overcome the performance limitations of the basic SC algorithm in short code blocks, the Successive Cancellation List (SCL) and the Cyclic Redundancy Check-Aided Successive Cancellation List (CA-SCL) decoding algorithms have been proposed as improved solutions [18, 19]. The SCL algorithm maintains a list of candidate decoding paths (with a list size L) and expands up to L paths for each information bit, thereby reducing the impact of errors in any single decoding path. At the final stage, the most probable path is selected as the output, significantly enhancing error correction performance [18]. CA-SCL further integrates cyclic redundancy check (CRC) check bits during encoding, and during decoding, it prioritizes candidate paths that pass the CRC check. In the final selection, only the CRC-passing paths are considered, which further improves decoding accuracy [19]. In the 5G NR system, to meet the dual requirements of high reliability and short code length for control channels, CA-SCL algorithm is used for Polar-coded control information (<https://portal.3gpp.org>).

LDPC and Polar comparison in 6G

As the two most promising mainstream channel coding technologies for 6G, LDPC codes and Polar codes have made important progress in their respective fields. In this section, we discuss and analyze the development process of LDPC codes and Polar in 6G from four aspects: data throughput, error correction performance, decoding complexity and hardware implementation, flexibility and adaptive coding.

Data throughput

Channel coding in 6G communication system presents significant challenges due to the stringent power and energy efficiency constraints required to achieve Tb/s throughput. As a key physical layer technology for achieving ultra-high-throughput, channel coding schemes must continue to evolve through innovations in code structure design, improvements in decoding algorithms, and more efficient hardware architecture in order to meet the stringent performance requirements of 6G. At present, significant progress has been made in achieving Tb/s-level high-throughput decoding schemes for both LDPC and Polar codes. In the following, we provide a comparative analysis of the technical challenges and specific solutions related to realizing Tb/s throughput for these two coding schemes.

Achieving Tb/s-level throughput inevitably requires extensive parallel computation [20]. However, due to the recursive structure of channel polarization, Polar codes exhibit inherent sequential dependencies. Although SCL and CA-SCL decoding allow partial parallelism during path expansion and CRC checking, the core decoding process still requires sequential execution, thereby limiting the parallel decoding capability of Polar codes. In recent years, more high-speed Polar code decoder designs based on parallel architecture have

been proposed, including pipeline structures, partially parallel decoding and improved SC decoders [21–23]. These methods achieve higher throughput and reduce complexity in hardware implementation. The current Fast Polar code solution has achieved a data throughput of 1229 Gbps, meeting the throughput requirements of 6G [24]. The Fast Polar code solution improves decoding efficiency by optimizing the entire decoding tree architecture and hardware design.

The decoding algorithm of Fast Polar codes builds upon the Simple SCL (SSCL) framework [23, 24]. The SSCL decoding algorithm accelerates conventional SCL decoding by identifying 4 types of special nodes: Rate-

0, Rate-1, Repetition (REP), and Single Parity Check (SPC). A Rate-0 node consists entirely of frozen bits, which are typically set to zero, while a Rate-1 node contains only information bits. A Rep node has all bits frozen except for the last one, which is an information bit. In contrast, an SPC node has only the first bit frozen, with the remaining bits serving as information bits [24]. Fig. 5 illustrates the decoding tree of a Polar code ($N = 32$, $K = 16$), which contains 4 types of special nodes. These special nodes enhance decoding efficiency by reducing recursive traversals, minimizing path expansions, and enabling parallel computation. As shown in Fig. 6, the decoding tree of Fig. 5 has been simplified by applying special node identification.

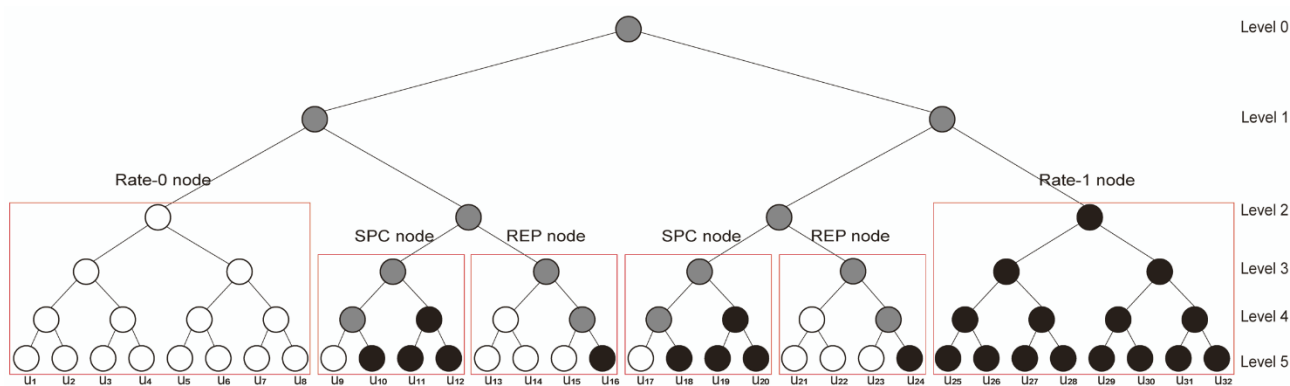


Fig. 5. Decoding Tree of a Polar Code ($N = 32$, $K = 16$) with 4 Types of Special Nodes

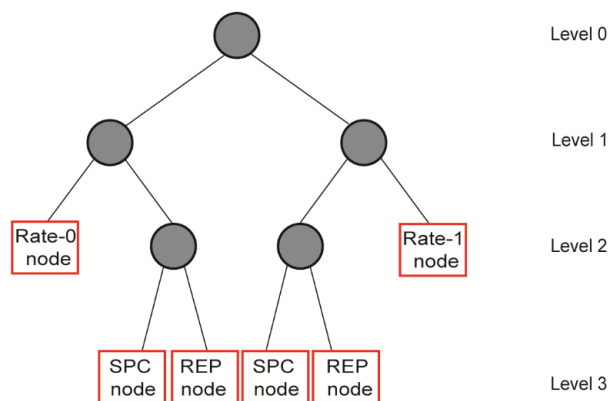


Fig. 6. Simplified Decoding Tree of a Polar Code ($N = 32$, $K = 16$)

The Fast SC decoding algorithm further extends 4 additional types of special nodes (subtree structures): dual-SPC (SPC-2) nodes, dual-REP (REP-2) nodes, repeated parity check (RPC) nodes, and nested parity check (NPC) for each type [24]. Then for medium-code-rate nodes that do not contain any of the 8 special node types, 2 extended Bose – Chaudhuri – Hocquenghem (BCH) codes are introduced to replace the original outer Polar code. By leveraging the superior minimum distance of BCH codes, this approach enhances error correction capability while also reducing decoding latency. Finally, by reallocating the code rate across the entire Polar code, all nodes reaching a certain size can

be transformed into one of the 8 special node types or replaced with BCH codes, thereby maximizing the potential for fast decoding. The Fast SC decoding tree structure can be briefly represented as shown in Fig. 7. Such an approach significantly simplifies the decoding tree structure, greatly reducing the traversal depth, effectively avoiding the inefficient path processing overhead commonly encountered in conventional SCL decoders, thereby substantially improving decoding speed and laying the foundation for highly parallel decoding architectures. In hardware implementation, Fast Polar decoders commonly adopt a fully unrolled pipelined architecture combined with multiple dedicated processing elements, maximizing both parallel coverage of the decoding process and hardware resource utilization, thus supporting Tbps-level high-speed communication demands [24]. The unfolded decoder for Fast Polar codes implemented on 16 nm FPGA supports a code length of $N=1024$ and a code rate of $R = 0.875$. With a chip area of just 0.3 mm², it achieves an impressive data throughput of 1229 Gbps, reaching a breakthrough area efficiency of 4096 Gbps/mm².

Unlike Polar codes, LDPC codes, due to their sparse parity-check matrix structure and the characteristics of message-passing algorithms, can achieve efficient parallel decoding by enabling simultaneous operations on multiple nodes through the Tanner graph [9, 12, 25]. In

practical applications, the high parallelism of LDPC codes can cause multiple processing units to access the same nodes simultaneously, leading to data access conflicts and routing congestion, which ultimately degrade decoding performance [25]. The routing congestion problem in high-throughput LDPC decoders essentially arises from hardware resource contention caused by

the parallel computation mode. By optimizing the decoding algorithms and hardware architectures, routing congestion can be alleviated, thereby maximizing hardware utilization. The row-based and column-based layered decoding algorithms group check nodes or variable nodes into layers, processing one layer at a time.

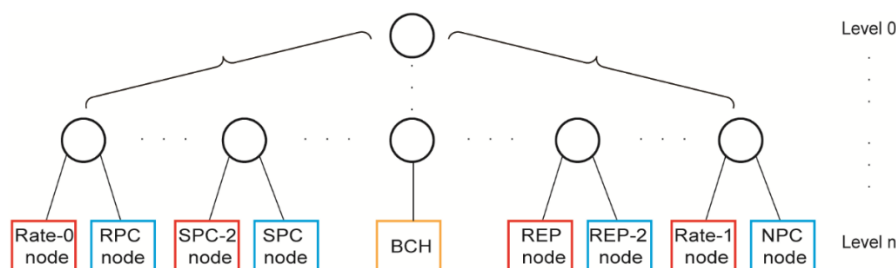


Fig. 7. Fast SC Decoding Tree with 8 Types of Special Nodes and BCH Codes

This decoding method is no longer fully parallel but partially parallel, yet it still significantly improves throughput while alleviating routing congestion issues [12, 25]. Currently, the highest-throughput LDPC decoder adopts a full-row layered decoding algorithm, combined with frame interleaving and multi-core techniques, achieving a data throughput of 860 Gbps [12]. The entire decoding process uses only a three-stage pipeline, where frame interleaving allows different frames' data to be interleaved and processed simultaneously within the pipeline, enhancing parallelism and hardware utilization while keeping the architecture simple. The above decoder adopts an 8-core parallel architecture implemented with 16nm ASIC technology, achieving 860 Gbps data throughput for the (1032, 860) LDPC code. It occupies a core area of 1.48 mm², resulting in an area efficiency of 581.1 Gbps/mm². Meanwhile, the decoder maintains flexibility in code rate, iteration count, early stop, and suitable for (1–2K) medium length LDPC codes. The current highest throughput decoding solutions for Polar and LDPC codes are compared in Table 1.

TABLE 1. Comparison of Highest Throughput Decoders for Polar and LDPC Codes

Parameter	Polar codes	LDPC codes
Throughput (Gbps)	1229	860
Algorithm	Fast Polar	Layered
Decoding architecture	Fully unrolled pipelined dedicated processing elements	Multi-core full-row parallel layered frame interleaving
Code length	1024	1032
Code rate	7/8	5/6
Technology	16 nm FPGA	16 nm ASIC
Frequency (MHz)	1200	1000
Core area (mm ²)	0.30	1.48
Area efficiency (Gbps/mm ²)	4096	581.1

Parameter	Polar codes	LDPC codes
Energy efficiency (pJ/bit)	0.63	3.24
Supported code lengths	Fixed	(1–2k)
Supported code rates	Fixed	Flexible code rate

As shown in Table 1, the data throughput of Polar codes is significantly higher, primarily due to the extremely unfolded pipelined design. However, leading in throughput does not imply comprehensive superiority; the Polar solution achieves its throughput at the cost of extremely high resource consumption. The Fast Polar decoder fully unfolds the entire Polar decoding tree, assigning a dedicated computational unit to each node for maximum parallelism. As code length increases, the required logic gate count grows exponentially, severely constraining practical applications. In reality, Polar codes can only be implemented with limited lengths – longer codes (more than 10000 bits) become impractical. This approach is highly customized, supporting only fixed code lengths and code rates. Any changes in communication standards or application requirements necessitate complete hardware redesign, making large-scale production challenging. In real world communication systems, channel coding needs to dynamically adapt to different scenarios, and the lack of flexibility is a major drawback. In contrast, LDPC decoding solutions achieve a better balance between high-throughput, and flexibility. Although its multi-core architecture enhances performance, it also incurs substantial hardware resource consumption, potentially limiting deployment in resource-constrained applications. In summary, if extreme throughput and energy efficiency are the priority and resources are abundant, the fully unfolded Polar solution is a good choice. However, if usability, flexibility, and scalability are more critical, the multi-core LDPC architecture is clearly the more practical and rational option.

Error correction performance

The error correction performance of both LDPC and Polar codes improves significantly as the code length increases, but their optimization mechanisms differ. LDPC codes benefit from the increased structural flexibility of the parity-check matrix, enabling the construction of sparse matrices with larger minimum girth, which effectively reduces the error floor [26]. In contrast, Polar codes rely on the channel polarization effect; as the code length N increases, the proportion of reliable subchannels K/N approaches the channel capacity C , theoretically enabling performance close to the Shannon limit [17]. Under short code length conditions, LDPC codes suffer from increased error floors due to limited sparsity and smaller girth, while Polar codes experience a decline in error correction capability due to incomplete channel polarization and a higher number of unreliable subchannels. In addition to code length and structure, the choice of decoding algorithm also significantly impacts the error-correcting performance of LDPC and Polar codes. Generally speaking, more advanced and complex decoding algorithms provide better error correction performance [27, 28].

In the 6G system, the error correction performance of LDPC and Polar codes continues to evolve to meet the demands of ultra-large-scale data transmission and ultra-high reliability, and is constantly optimized for their respective applicable scenarios. For LDPC codes, in order to improve the base matrix design, a graph theoretic method based on edge coloring has been proposed. In the construction of codes, this method analyzes the edge coloring properties of the VN graph to identify specific 6-cycle and 8-cycle structures that should be avoided in the exponent matrix. By effectively eliminating the occurrence of 8-cycles, the code performance is enhanced and the error floor is significantly reduced [26]. At the same time, to improve the performance of layered decoding algorithms, analyzing the trapping sets layer profile and optimizing the layer update order can effectively reduce the error floor of LDPC decoders and enhance error-correcting capability [27]. Additionally, to improve performance in short code length scenarios, generalized LDPC codes have been proposed, in which some of the single parity check nodes in traditional LDPC codes are replaced with more powerful generalized constraint nodes (such as BCH codes). Combined with optimized decoding algorithms, this approach improves error correcting performance and decoding efficiency in short block lengths, surpassing Polar codes and CA-SCL decoding schemes [29]. For Polar codes, to further enhance performance in short code length, Parity-Check-Concatenated Polar Codes have been proposed. By introducing parity-check codes outside the Polar code structure and leveraging their flexible design with distributed layout characteristics, this approach helps the SCL decoder effectively detect and prune error paths [30], thus demonstrating enhanced error correction capability in short-

code and low-code-rate scenarios. Improvements to the decoder include two methods aimed at leveraging the error correction capability of CRC to enhance the decoding performance of Polar codes under short code length conditions [28]. Error-Correcting Table based segmented CA-SCL decoder introduce segmented CRC checks and pre-constructed error lookup tables to enable efficient identification and correction of local errors, thereby improving overall decoding performance. Deep Learning based segmented CA-SCL decoder leverages deep learning models to automatically learn complex error patterns and combines them with segmented CRC for dynamic path adjustment and error correction, thus enhancing decoding accuracy, robustness, and adaptability [28].

Overall, the development direction for 6G LDPC codes focuses on achieving efficient error correction performance across both long and short code length scenarios by enhancing girth, eliminating the effects of trap sets and optimizing short codes structures, while Polar codes, through structural and decoder optimization, have enhanced its performance advantage in short code length, demonstrating stronger competitiveness in control signaling and small data packet high-reliability transmission.

Decoding complexity and hardware implementation

LDPC codes employ message-passing-based iterative decoding algorithms, such as the belief propagation (BP) algorithm, the min sum (MS) algorithm, and their improved variants [31, 32]. The core idea of message passing is to progressively refine the estimation of the codeword through information exchange between VNs and CNs. The typical decoding complexity of LDPC codes is $O(Nd_cI)$ where N is the code length, d_c is the check node degree, and I is the number of iterations. O represents the scaling trend of decoding complexity, but since the computational load for a single message update operation differs across algorithms, the actual complexity must be multiplied by a different constant. In Polar code decoding, the SC algorithm processes each bit by traversing a tree of depth $\log N$, resulting in an overall complexity of $O(N \log N)$ for N bits [17]. The SCL algorithm enhances SC by maintaining L decoding paths. The increased complexity in SCL comes from path extension, metric calculation, and pruning, raising the total complexity to $O(LN \log N + LN \log L)$ [18]. CA-SCL further adds a CRC check on top of SCL. For each of the L candidate paths, a CRC check with complexity $O(m)$ (where m is the CRC length) is performed. Therefore, the CRC stage adds $O(Lm)$ to the overall cost, resulting in a final CA-SCL decoding complexity of $O(LN \log N + LN \log L + Lm)$ [18, 19]. Generally, higher-order decoding algorithms exhibit higher computational complexity and superior decoding performance. However, theoretical performance should not be the sole focus; the feasibility and efficiency of hardware implementation must also be carefully considered.

In practical applications, LDPC and Polar codes face different challenges in hardware implementation. LDPC decoding relies heavily on parallel and iterative computations, which generate a large volume of intermediate data, often leading to routing congestion and significantly increasing memory resource requirements [6, 33]. In contrast, Polar codes typically employ SCL and its enhanced decoding algorithms, which require tracking multiple decoding paths simultaneously. Each path must independently store its intermediate states, resulting in significant implementation challenges in multi-path memory management, path sorting, and parallelization within the recursive decoding structure [18, 34, 35]. LDPC codes can reduce the routing complexity of decoders by optimizing the interconnect structure between nodes. Simultaneously, strategies such as layered decoding and phased update mechanisms can effectively mitigate computational resource contention and routing congestion [12, 25, 33]. Building on this, the introduction of multi-level storage architectures and intelligent data scheduling mechanisms enables most data flows to be processed locally, significantly reducing long distance cross module transfers and routing resource consumption, while avoiding redundant data access, computation, and storage operations [36]. These techniques significantly reduce hardware resource consumption while meeting high-throughput demands, making LDPC codes especially suitable for 6G communication systems where both energy efficiency and throughput are critical.

SCL decoding algorithms and their variants can dynamically eliminate redundant paths through techniques like path merging and pruning, thereby reducing the number of paths that need to be managed and stored during decoding [34, 35]. Additionally, by integrating node-level parallel processing, unfolded hardware implementations of recursive structures, and pipeline optimization strategies, higher data throughput and efficient utilization of hardware resources can be achieved while ensuring decoding performance [22, 24]. The main practical issues of LDPC and Polar codes, along with their corresponding solutions in decoding algorithms and hardware optimization, are given in Table 2.

TABLE 2. The Main Application Challenges of LDPC and Polar Codes, and Their Solutions in Decoding Algorithms and Hardware Optimization

Aspects	LDPC codes	Polar codes
Main hardware challenges	High storage resource consumption, routing congestion, resource contention	Large multi-path storage overhead, complex path sorting management, recursive structure hinders parallelism
Algorithm optimization strategies	Layered decoding, partial update, optimized Tanner graph connectivity	Path pruning and merging, simplified path splitting, node-level parallelism

Aspects	LDPC codes	Polar codes
Hardware optimization methods	Multi-level memory hierarchy, intelligent data scheduling, localized memory access, module reuse and compute / data separation	Unrolled recursive structure, pipeline structure design, compressed storage and path reuse

In conclusion, a more rational decoding algorithm design can significantly alleviate common challenges encountered in hardware deployment. By combining hardware-oriented structural optimization and efficient implementation strategies, it is possible to not only improve overall decoding efficiency but also reduce area and power consumption while meeting performance requirements, thereby achieving a communication system design with higher engineering feasibility.

Flexibility and adaptive coding

The communication environment in 6G systems is more complex and dynamic, requiring channel coding schemes to possess a high degree of flexibility and adaptability. Flexibility refers to the ability of a coding scheme to support various code lengths, code rates, and hardware implementation architectures, serving as the foundation for adaptability. Adaptability refers to the capability of the coding scheme to dynamically adjust its parameters based on real-time channel conditions, user demands, and resource availability.

As the two mainstream channel coding schemes, LDPC codes and Polar codes demonstrate different strengths and application scopes in terms of flexibility and adaptability due to their structural design differences. LDPC codes, owing to the sparse structure of their parity-check matrices, exhibit excellent performance in terms of flexibility and adaptability [32, 37]. Through flexible configuration of matrix structures, LDPC codes support a wide range of code lengths and code rates, accommodating various modulation schemes and spectrum configurations. This enables effective support for dynamic spectrum access and elastic resource scheduling [38]. At the hardware level, the quasi-cyclic structure of LDPC codes facilitates modular hardware design, enhancing hardware reusability and allowing flexible parameter adjustment based on service requirements. This endows encoder and decoder architectures with dynamic reconfiguration capabilities [37, 38]. In terms of adaptability, LDPC codes utilize mechanisms such as puncturing, repetition, and rate matching to flexibly adjust the effective code rate under dynamic channel conditions [38, 39]. In HARQ schemes, LDPC codes support incremental redundancy retransmission and soft information accumulation decoding, significantly improving link reliability and transmission efficiency [40]. Furthermore, LDPC codes have the ability to dynamically optimize the decoding process based on channel conditions. By adding a small amount of logic and memory overhead, the maximum number of decoding iterations can be

adaptively adjusted according to the channel state, achieving an optimized balance between decoding performance and computational complexity [41].

Compared with LDPC codes, Polar codes exhibit certain limitations in terms of flexibility, as their code length must be 2^n [17, 42]. This constraint compromises both the efficiency and performance of traditional construction methods when dealing with codewords whose lengths are not 2^n , thus limiting their suitability for large-scale, dynamic resource allocation scenarios [42]. To overcome the limitations of traditional Polar codes in terms of flexibility, researchers have proposed various enhancement strategies. Firstly, at the code construction level, general construction techniques such as universal frozen bit interpolation and simulation-driven codeword optimization have been introduced. These methods reduce reliance on specific channel models, thereby improving the applicability of Polar codes across diverse channel conditions [43–45]. Secondly, to address the original design constraint of Polar codes supporting only code lengths that are 2^n , researchers have developed variable-length techniques such as puncturing and shortening, enabling encoding for arbitrary frame lengths [46, 47]. In terms of adaptability, Polar codes have also shown progressive improvements. By dynamically selecting frozen bit positions, pruning decoding paths, and adjusting decoding depth, Polar codes can optimize the decoding process in real time according to channel quality [48, 49]. Moreover, some studies have introduced AI-based mechanisms for path selection, aiming to achieve intelligent and channel-aware adaptive optimization [28].

6G long and short code block channel coding selection

6G communication scenarios are expected to exhibit an unprecedented diversity of requirements. On one hand, the growing demands of high-throughput services such as 4K/8K video, XR, and holographic communications are driving the evolution of 6G channel coding toward longer, high-capacity codes capable of supporting Tbps-level data streams with enhanced robustness. Accordingly, code lengths are expected to exceed 10000 bits [6] (<https://hexa-x-ii.eu/wp-content/uploads/2024/04/Hexa-X-II%20D4%203%20v1.0%20final.pdf>). On the other hand, scenarios such as IoT cluster communication, control signaling, semantic communications, and V2X frequently involve small data packets, instantaneous response, and low-complexity constraints, which drive coding technologies to further optimize toward ultra-short code lengths (such as less than 128 bits) [50, 51]. The evolution trends in code lengths for 6G channel coding are summarized in Table 3.

TABLE 3. Comparison between Long and Short Code Design Considerations in 6G Channel Coding

Aspects	Long code	Short code
Code length range	> 10000 bits	< 128 bits
Application scenarios	Holographic communications, 4 K / 8 K video, XR entertainment	V2X, IoT cluster communication, semantic communication, control signaling
Performance characteristics	High error correction capability, near capacity performance, high parallelism	Low latency, low complexity, fast decoding
Deployment characteristics	Rich computing resources (e.g., base stations, edge servers)	Resource-constrained nodes (e.g., terminals, sensors)

The stringent requirements for both long and short codes in 6G communications have spurred extensive research on LDPC and Polar codes. In general, implementing high-throughput decoders for short codes is relatively easier than for long codes, as they require less memory, simpler wiring and control logic, and are more amenable to parallel and pipelined processing. Consequently, short code decoders are more likely to achieve both high throughput and low latency in practical hardware deployments. By contrast, although long codes offer higher coding gains and better error performance, their decoder design and hardware implementation still face a number of technical challenges. For LDPC codes, increasing the code length leads to a more complex parity-check matrix, resulting in excessive interconnect usage, routing congestion, and clock closure difficulties in hardware implementation [25, 52]. Moreover, the iterative decoding process involves a large number of parallel node updates and message exchanges across thousands of edges, placing heavy demands on computational resources and memory bandwidth [53]. These factors degrade the iteration speed and further exacerbate latency and power consumption constraints. Currently, SC-LDPC codes can significantly alleviate the aforementioned implementation challenges due to their favorable structural characteristics, thereby enabling the design of high-throughput decoders for long code applications [33, 52]. Polar codes, on the other hand, demonstrate excellent performance in short code scenarios – particularly when employing SCL and its variants as decoding algorithms. However, in long code regimes, they face notable limitations. Due to the bit serial nature of the Polar codes structure, parallelism is limited; as the length N and list size L increase, the overhead of path management, metric updating and sorting, and LLR/partial-sum accesses in SCL decoding grows accordingly [17, 54], making it more challenging to realize hardware with both high throughput and low latency for long codes [18, 55]. As a result, there is currently a lack of landmark

hardware implementations for high-throughput decoders targeting long Polar codes. Table 4 summarizes the comparison of LDPC codes and Polar codes from different perspectives of high-throughput decoding schemes for long code length.

TABLE 4. Simplified Comparison: Long-Length LDPC vs. Polar Codes in High-Throughput Implementation

Aspects	LDPC	Polar
Structure	Large-scale parity matrix, routing congestion	Deep decoding tree, hierarchical dependencies
Decoding	Iterative, parallel message passing	Serial SC/SCL, bit-wise dependency
Resources	High compute and memory bandwidth	Exponential path/memory growth
Throughput	Limited by iteration and interconnect	Hard to parallelize, low throughput
Feasibility	Mature hardware solutions (e.g., SC/QC-LDPC)	No high-throughput long-code implementations

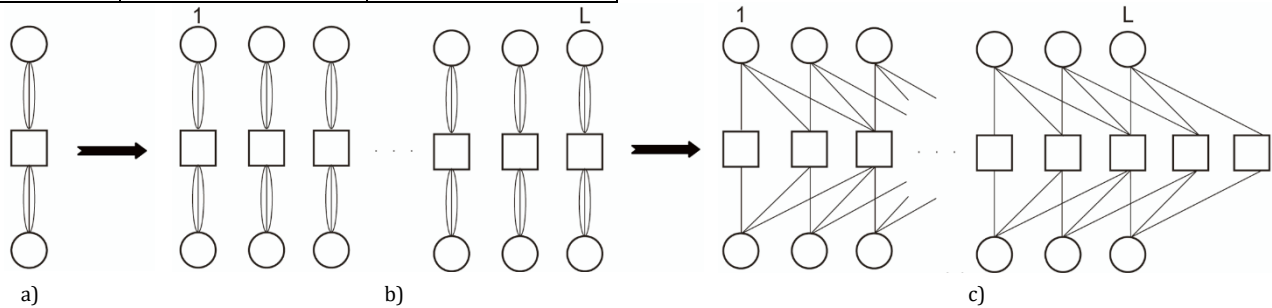


Fig. 8. The Construction Process of SC-LDPC Code Original Modal Map

Their architecture enables the chaining of multiple sub-decoders, each operating on smaller, localized sub-blocks in a pipelined manner. This architectural advantage makes SC-LDPC particularly suitable for Tbps-class decoder implementations in next-generation systems [33, 52]. The decoder architecture based on the fully parallel window decoding (FPWD) mechanism is the first SC-LDPC decoder capable of achieving a throughput exceeding 100 Gbps [33]. In this architecture, multiple window decoders operate fully in parallel, each independently processing a segment of the code-word, which significantly enhances decoding concurrency. To support high-throughput data streams, a custom interconnect network is implemented, and the CN and VN processors are optimized through pipelining to eliminate data dependency bottlenecks. Additionally, by introducing register reuse and efficient message update mechanisms, the system achieves a throughput of 336 Gbps (operating at 700 MHz) using the 22 nm FD-SOI process for an SC-LDPC code with a length of 51328, a sub-block size of 640, and a coupling width of 1. However, the architecture supports only fixed code lengths and rates, which limits its flexibility for dynamic or adaptive communication scenarios.

With the advancement of system-on-chip (SoC) technology, there remains significant potential to further improve data throughput. A key challenge is achieving

In practical applications, it has been observed that, apart from SC-LDPC codes, most other coding schemes are restricted to short block lengths when targeting Tbps-level throughput [52, 56, 57]. In contrast, SC-LDPC codes, owing to their spatially coupled, stream-like (semi-infinite) structure, can theoretically support extremely long block lengths without compromising decoder throughput.

The process of constructing a $(3, 6, 2, L)$ SC-LDPC code coupling chain is as follows: Fig. 8a is a $(3, 6)$ regular LDPC code protomodule graph with the basis matrix $\mathbf{B} = [3 \ 3]$, and Fig. 8b is the L identical but mutually uncorrelated LDPC code protomodule graphs. Then, the L mutually uncorrelated LDPC code original modal graphs are connected according to the edge expansion rule to obtain a SC-LDPC code coupling chain, as shown in Fig. 8c.

high throughput while supporting diverse code rates and lengths to address varied communication needs. Recent developments in SC-LDPC codes have demonstrated notable improvements inflexibility [58, 59]. Traditional SC-LDPC codes are typically constructed by applying edge spreading to a predefined LDPC block code, which inherently limits the design space due to structural constraints. In contrast, Edge-Spreading Raptor-Like (ESRL) SC-LDPC codes are free from such dependencies and directly target the optimization of the coupled matrix from the ground up [58]. This design philosophy introduces structural asymmetry, providing greater flexibility in constructing the coupled protograph. The ESRL code structure is described by the triplet $\mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{Q}$, $\mathbf{B}$ is the uncoupled protograph, $\mathbf{T}$ is the edge-spreading matrix, and $\mathbf{Q}$ is the tail matrix. By enabling flexible tail matrix pruning, ESRL codes support continuously adjustable code rates, making them particularly well-suited for dynamic service requirements in 6G scenarios. Under the same hardware conditions, ESRL architecture achieves significantly higher throughput than conventional 5G-NR LDPC codes, reaching 209.4 Gbps with a maximum block length of 23790 bits.

SC-LDPC codes, with their unique structure, remain one of the most promising solutions for achieving Tbps-

level throughput in long block length scenarios, demonstrating excellent parallelism and hardware adaptability [33, 52, 58]. Although LDPC codes offer excellent performance and high parallelism in long code scenarios, their performance significantly degrades in short code applications. In such cases, short cycles are more likely to form in the Tanner graph, leading to poor iterative convergence, increased error propagation, and the emergence of error floors. Moreover, LDPC decoders typically consume substantial hardware resources, have low efficiency when processing short packets, and exhibit poor overall energy efficiency.

Polar codes also face certain challenges in short code scenarios, such as insufficient polarization, latency due to their inherently sequential decoding structure, and increased hardware complexity caused by multipath decision processing. However, these issues can be mitigated by introducing CA-SCL decoding to enhance path selection reliability [19], applying Fast-SSCL architectures to accelerate decoding, and utilizing path merging and sorting optimizations to reduce computational redundancy and hardware costs [60]. As a result, Polar codes have achieved a favorable balance between performance and efficiency in short-code control signaling in 5G systems. Building on the adoption of Polar codes for control signaling in 5G, short-code design in 6G is expected to further pursue ultra-low latency, ultra-low power consumption, and dynamic adaptability [61, 62]. New approaches may include enhanced CRC-aided optimization and neural network-based coding schemes to meet the increasing complexity and granularity of control signaling requirements [63]. Ultimately, the goal is to achieve low-complexity, highly reliable coding mechanisms for ubiquitous communication, thereby supporting the intelligent network infrastructure of 6G.

Uniform channel coding framework

Given that the 3GPP has yet to finalize the channel coding standard for 6G, both academia and industry are actively exploring the feasibility of a unified coding framework [64]. It is important to note that “unified” does not necessarily imply the use of a single channel code [64–66]. A unified coding framework can follow two main approaches (1) employing a single channel code to cover all scenarios, or (2) constructing a flexible platform capable of dynamically switching between or combining multiple coding schemes.

The first approach aims to develop a highly scalable universal channel code capable of covering a wide range of communication scenarios – from ultra-short to long packets, and from ultra-low latency to ultra-high throughput. A prominent example in this direction is the Generalized LDPC with Polar-like Components (GLDPC-PC) code, which combines the sparsity of LDPC codes with the structural properties of Polar codes [66]. Simulation results have shown that GLDPC-PC can outperform 5G LDPC codes by approximately 0.3 dB at a BER of

10^{-4} under medium code lengths (1024–8192 bits), while also reducing the number of decoding iterations by about half to one-third. This makes GLDPC-PC a promising candidate for a unified coding framework in 6G. However, its robustness and scalability for extreme short-code (< 128 bits) and long-code (> 10k bits) scenarios still require further investigation.

The second approach in the pursuit of multi-code-cooperative unified FEC architectures is exemplified by three recent works, which reflect distinct but complementary strategies toward this goal: model-level abstraction via neural networks, instruction-level programmability, and full hardware-level integration [65, 67, 68]. First, the Unified Error Correction Code Transformer (UECCT) introduces a transformer-based, code-agnostic neural decoder capable of simultaneously decoding multiple linear block codes (LDPC, Polar, BCH) within a single architecture [65]. This work establishes a new model-level unification paradigm based on deep learning, offering enhanced flexibility and scalability for AI-native 6G receivers. It is particularly well-suited for short-packet communications, control channels, and intelligent edge applications. At the microarchitectural level, multi-mode platforms such as the Quad-mode Forward Error Correction Application-Specific Instruction-set Processor (QFEC ASIP) propose a software-defined decoder supporting LDPC, Polar, Turbo, and convolutional codes [67]. QFEC offers a compelling programmable decoding solution with excellent area and energy efficiency, suitable for SoCs and software-defined radio (SDR) platforms in heterogeneous network environments. Finally, at the hardware integration level, a chip-level solution supports LDPC, Polar, Turbo, and convolutional codes under a unified data path and memory system [68]. This design represents the hardware-level convergence of multiple decoding logics and resources, effectively addressing scalability bottlenecks in large structured codes and enabling real-time decoding for 6G transceivers. The development status of these three types of multi-code cooperative frameworks is summarized in Table 5. Those research works collectively demonstrate that multi-code cooperative frameworks is a viable route toward 6G FEC unification. The direction forward lies in cross-layer co-design that enables adaptability, reuse, and efficiency across multiple abstraction levels. However, such cooperation also introduces overheads in design complexity, scheduling, and memory management, which may limit scalability in real-time applications. Moreover, while these solutions achieve decoder-level integration, full stack-level convergence – particularly in link adaptation and cross-layer control – remains an open research challenge.

TABLE 5. Development Status of These Three Types of Multi-Code Cooperative Frameworks

Layer	Representative Work	Key Innovation
Model	UECCT	Transformer-based neural decoder with shared logic
Micro-architecture	QFEC ASIP	Instruction-level decoder with mode reusability
Hardware SoC	Fully Configurable Decoder	Unified data path, compression, quad-mode chip

Challenges and future directions

In 6G systems, both LDPC and Polar codes face significant challenges related to computational complexity, which becomes increasingly critical given the rising demands for ultra-high data rates and ultra-low latency. Efficient hardware implementation is another pressing issue, especially in largescale, resource-constrained 6G deployments. One of the core challenges is to strike a balanced trade-off among error correction performance, energy efficiency, and decoding latency, ensuring that these channel coding techniques can adapt to diverse and dynamic application scenarios.

Looking ahead, LDPC and Polar codes are expected to increasingly integrate with AI techniques to enable intelligent adaptation and optimization. By leveraging channel state information and historical data, AI-assisted encoders and decoders can dynamically adjust parameters to optimize performance under varying channel conditions. Additionally, the use of general-purpose processors such as GPUs can facilitate structural optimization and decoding acceleration. Specifically, GPUs can help optimize interconnect topologies

for LDPC codes and enhance path selection strategies for Polar codes, ultimately improving energy efficiency and boosting overall throughput. These directions represent promising pathways toward making LDPC and Polar codes more robust, flexible, and scalable for future 6G communication systems.

Conclusions

In the paper, we analyze the development status of LDPC and Polar codes in the context of 6G communication, with particular focus on the design considerations for long and short code blocks. Significant progress has been made in achieving Tbps-level throughput for short codes, where Polar codes demonstrate outstanding decoding efficiency and energy performance. However, LDPC codes offer superior flexibility and adaptability, making them more favorable in dynamic communication environments.

For long block length scenarios, SC-LDPC codes maintain a strong advantage due to their structured parallelism and hardware scalability. In contrast, polar codes face limitations stemming from their sequential decoding nature, channel polarization dependency, and implementation challenges at large code lengths.

Importantly, we emphasize that the evolution of 6G channel coding should not be viewed as a competition between LDPC and Polar codes, but rather as a path toward coexistence and potential integration. The emergence of unified frameworks – such as GLDPC-PC codes, AI-assisted decoding strategies, and reconfigurable multi-mode platforms – indicates a promising direction for designing adaptive and efficient FEC architectures capable of meeting the diverse demands of 6G systems.

References

1. Zhang H., Tong W. Channel Coding for 6G Extreme Connectivity – Requirements, Capabilities, and Fundamental Tradeoffs. *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023;3(1):54–66. DOI:10.1109/MBITS.2023.3322978
2. Lu Y., Zheng X. 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues. *Journal of Industrial Information Integration*. 2020;19:100158. DOI:10.1016/j.jii.2020.100158. EDN:BIOOJV
3. Zong B., Fan C., Wang X., Duan X., Wang B., Wang J. 6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2019;14(3):18–27. DOI:10.1109/MVT.2019.2921398
4. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC'93, 23–26 May 1993, Geneva, Switzerland, vol.2*. IEEE; 1993. p.1064–1070. DOI:10.1109/ICC.1993.397441
5. Yue C., Miloslavskaya V., Shirvanimoghaddam M., Vucetic B., Li Y. Efficient Decoders for Short Block Length Codes in 6G URLLC. *IEEE Communications Magazine*. 2023;61(4):84–90. DOI:10.1109/MCOM.001.2200275. EDN:PULBIK
6. Rowshan M., Qiu M., Xie Y., Gu X., Yuan J. Channel Coding Toward 6G: Technical Overview and Outlook. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024;5:2585–2685. DOI:10.1109/OJCOMS.2024.3390000. EDN:WBHYCS
7. Miao S., Kestel C., Johannsen L., Geiselhart M., Schmalen L., Balatsoukas-Stimming A., et al. Trends in channel coding for 6G. *Proceedings of the IEEE*. 2024;112(7):653–675. DOI:10.1109/JPROC.2024.3416050
8. Gautam A., Thakur P., Singh G. Advanced channel coding schemes for B5G/6G networks: State-of-the-art analysis, research challenges and future directions. *International Journal of Communication Systems*. 2024;37(13):e5855. DOI:10.1002/dac.5855. EDN:WMSPSO
9. Gallager R. Low-density parity-check codes. *IRE Transactions on Information Theory*. 1962;8(1):21–28. DOI:10.1109/TIT.1962.1057683
10. Chen L., Xu J., Djurdjevic I., Lin S. Near-Shannon-limit quasi-cyclic low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2004;52(7):1038–1042. DOI:10.1109/TCOMM.2004.831353
11. Fosserier M.P. Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2004;50(8):1788–1793. DOI:10.1109/TIT.2004.831841

12. Li M., Derudder V., Bertrand K., Desset C., Bourdoux A. High-speed LDPC decoders towards 1 Tb/s. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2021;68(5):2224–2233. DOI:10.1109/TCSI.2021.3060880. EDN:UTRSUU
13. Tanner R. A recursive approach to low complexity codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1981;27(5):533–547. DOI:10.1109/TIT.1981.1056404
14. Zhu H., Pu L., Xu H., Zhang B. Construction of Quasi-Cyclic LDPC Codes Based on Fundamental Theorem of Arithmetic. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018;5264724. DOI:10.1155/2018/5264724
15. Vatta F., Soranzo A., Babich F. Low-complexity bound on irregular LDPC belief-propagation decoding thresholds using a Gaussian approximation. *Electronics Letters*. 2018;54(17):1038–1040. DOI:10.1049/el.2018.0478
16. MacKay D.J., Neal R.M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes. *Electronics Letters*. 1997;33(6):457–458. DOI:10.1049/el:19961141
17. Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2009;55(7):3051–3073. DOI:10.1109/TIT.2009.2021379
18. Tal I., Vardy A. List Decoding of Polar Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015;61(5):2213–2226. DOI:10.1109/TIT.2015.2410251
19. Niu K., Chen K. CRC-Aided Decoding of Polar Codes. *IEEE Communications Letters*. 2012;16(10):1668–1671. DOI:10.1109/LCOMM.2012.090312.121501
20. Kestel C., Herrmann M., Wehn N. When channel coding hits the implementation wall. *Proceedings of the 2018 IEEE 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing, ISTC, 03–07 December 2018, Hong Kong, China*. IEEE; 2018. DOI:10.1109/ISTC.2018.8625324
21. Sarkis G., Giard P., Vardy A., Thibeault C., Gross W.J. Fast Polar Decoders: Algorithm and Implementation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014;32(5):946–957. DOI:10.1109/JSA.2014.140514
22. Giard P., Sarkis G., Thibeault C., Gross W.J. Multi-Mode Unrolled Architectures for Polar Decoders. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2016;63(9):1443–1453. DOI:10.1109/TCSI.2016.2586218
23. Alamdar-Yazdi A., Kschischang F.R. A Simplified Successive-Cancellation Decoder for Polar Codes. *IEEE Communications Letters*. 2011;15(12):1378–1380. DOI:10.1109/LCOMM.2011.101811.111480
24. Tong J., Wang X., Zhang Q., Zhang H., Wang J., Tong W. Fast polar codes for terabits-per-second throughput communications. *Proceedings of the 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 05–08 September 2023, Toronto, Canada*. IEEE; 2023. DOI:10.1109/PIMRC56721.2023.10293973
25. Ghanaatian R., Balatsoukas-Stimming A., Müller T.C., Meidlinger M., Matz G., Teman A., Burg A. A 588-Gb/s LDPC Decoder Based on Finite-Alphabet Message Passing. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2017;26(2):329–340. DOI:10.1109/TVLSI.2017.2766925
26. Amirzade F., Sadeghi M-R., Panario D. QC-LDPC Codes With Large Column Weight and Free of Small Size ETSS. *IEEE Communications Letters*. 2021;26(3):500–504. DOI:10.1109/LCOMM.2021.3138936. EDN:GIEZGG
27. Farsiabi A., Banihashemi A.H. Error Floor Analysis of LDPC Row Layered Decoders. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2021;67(9):5804–5826. DOI:10.1109/TIT.2021.3099020. EDN:IWPNIO
28. Liu X., Wu S., Wang Y., Zhang N., Jiao J., Zhang Q. Exploiting Error-Correction-CRC for Polar SCL Decoding: A Deep Learning-Based Approach. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*. 2019;6(2):817–828. DOI:10.1109/TCCN.2019.2946358. EDN:LEXLB
29. Liu Y., Olmos P.M., Mitchell D.G. Generalized LDPC Codes for Ultra Reliable Low Latency Communication in 5G and Beyond. *IEEE Access*. 2018;6:72002–72014. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2880997
30. Wang T., Qu D., Jiang T. Parity-check-concatenated polar codes. *IEEE Communications Letters*. 2016;20(12):2342–2345. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2880997. EDN:OYJXQ
31. Asif M., Khan W.U., Afzal H.R., Nebhen J., Ullah I., Rehman A.U., Kaabar M.K. Reduced-Complexity LDPC Decoding for Next-Generation IoT Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021. DOI:10.1155/2021/2029560. EDN:TRRDM
32. Niu K. Advanced Channel Coding for 6G. In: Lin X., Zhang J., Liu Y., Kim J. (eds.) *Fundamentals of 6G Communications and Networking*. Springer; 2023. p.259–290. DOI:10.1007/978-3-031-37920-8_10
33. Herrmann M., Wehn N., Thalmaier M., Fehrenz M., Lehnigk-Emden T., Alles M. A 336 Gbit/s Full-Parallel Window Decoder for Spatially Coupled LDPC Codes. *Proceedings of the Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit, EuCNC/6G Summit, 08–11 June 2021, Porto, Portugal*. IEEE; 2021. p.508–513. DOI:10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482457
34. Kam D., Kong B.Y., Lee Y. Low-Latency SCL Polar Decoder Architecture Using Overlapped Pruning Operations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2023;70(3):1417–1427. DOI:10.1109/TCSI.2022.3230589. EDN:XPVRKY
35. Tai Y., Li K., Zhou L., Liu S., Zhang X. An Improved CA-SCL Decoding Algorithm for Polar Code. *Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications, ISNCC, 19–22 July 2022, Shenzhen, China*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/ISNCC55209.2022.9851768
36. Kim B., Park I-C. Area-Efficient QC-LDPC Decoder Architecture Based on Stride Scheduling and Memory Bank Division. *IEICE Transactions on Communications*. 2013;E96(7):1772–1779. DOI:10.1587/transcom.E96.B.1772
37. Bezner P., Clausius J., Geiselhart M., Janz T., Krieg F., Obermüller S., et al. Towards Flexible LDPC Coding for 6G. *Proceedings of the 58th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 27–30 October 2024, USA, Pacific Grove*. IEEE; 2024. p.1119–1125. DOI:10.1109/IEEECONF60004.2024.10942769
38. Bae J.H., Abotabl A., Lin H-P., Song K-B., Lee J. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. 2019;8(1):e17. DOI:10.1017/ATSIP.2019.10
39. Alqudah A.A., Hayajneh K.F., Aldiabat H.A., Shakhatreh H.M. Efficient Generation of Puncturing-Assisted Rate-Matched 5G New Radio LDPC Codes for Faster-Than-Nyquist Signaling. *Journal of Communications*. 2024;19(2):90–98 DOI:10.12720/

jcm.19.2.90-98. EDN:UUKNAC

40. Nguyen C.T., Le H.D., Nguyen C.T., Pham A.T. Toward Practical HARQ-Based RC-LDPC Design for Optical Satellite-Assisted Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2024;60(6):8619–8634 DOI:10.1109/TAES.2024.3434768
41. Yuan R., Xie T., Jin Y. Dynamic Maximum Iteration Number Scheduling LDPC Decoder for Space-Based Internet of Things. *Proceedings of the 5th EAI International Conference on IoT as a Service, IoTaaS 2019, 16–17 November 2019, Xi'an, China. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol.316. Cham: Springer; 2020. p.235–241. DOI:10.1007/978-3-030-44751-9_20.
42. Korada S.B., Şaşıoğlu E., Urbanke R. Polar Codes: Characterization of Exponent, Bounds, and Constructions. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(12):6253–6264. DOI:10.1109/TIT.2010.2080990
43. Hassani S.H., Urbanke R. Universal polar codes. *Proceedings of the 2014 IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT, 29 June – 04 July 2014, Honolulu, USA*. IEEE; 2014. p.1451–1455. DOI:10.1109/ISIT.2014.6875073
44. Sun S., Zhang Z. Designing Practical Polar Codes Using Simulation-Based Bit Selection. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2017;7(4):594–603. DOI:10.1109/JETCAS.2017.2759253. EDN:YEMWHJ
45. Miloslavskaya V., Li Y., Vucetic B. Frozen Set Design for Precoded Polar Codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2024;73(1):77–92. DOI:10.1109/TCOMM.2024.3439431
46. Zhu H., Zhao Y. A Mapping Shortening Algorithm for Polar Codes. *IEEE Access*. 2019;7:87110–87117. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2926739. EDN:BLYVAC
47. Zhu H., Guan P., Cao Z., Zhao Y. Rate-compatible systematic polar codes. *IET Communications*. 2021;15(15):1930–1940. DOI:10.1049/cmu2.12204. EDN:OTVRFX
48. Trifonov P., Miloslavskaya V. Polar codes with dynamic frozen symbols and their decoding by directed search. *Proceedings of the 2013 IEEE Information Theory Workshop, ITW, 09–13 September 2013, Seville, Spain*. IEEE; 2013. DOI:10.1109/ITW.2013.6691213. EDN:SLLYAP
49. Miloslavskaya V., Li Y., Vucetic B. Design of Compactly Specified Polar Codes With Dynamic Frozen Bits Based on Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Communications*. 2023;72(3):1257–1272. DOI:10.1109/TCOMM.2023.3331532. EDN:LHWQVZ
50. Coşkun M.C., Durisi G., Jerkovits T., Liva G., Ryan W., Stein B., et al. Efficient error-correcting codes in the short blocklength regime. *Physical Communication*. 2019;34:66–79. DOI:10.1016/j.phycom.2019.03.004. EDN:XBHNSNP
51. Zhong X., Sham C-W., Ma S.L., Chou H-F., Mostaan A., Vu T.X., et al. Joint Source-Channel Coding System for 6G Communication: Design, Prototype and Future Directions. *IEEE Access*. 2024;12:72034–72046. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3360003. EDN:FJYGPJ
52. Herrmann M., Wehn N. Beyond 100 Gbit/s Pipeline Decoders for Spatially Coupled LDPC Codes. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2022;90. DOI:10.1186/s13638-022-02169-5. EDN:JHMSIO
53. Li H., Yu Z., Lu T., Zheng W., Feng H., Ma Z., et al. Novel memory efficient LDPC decoders for beyond 5G. *Physical Communication*. 2022;51:101538. DOI:10.1016/j.phycom.2021.101538. EDN:KGHOML
54. Presman N., Litsyn S. Recursive Descriptions of Polar Codes. *arXiv:1209.4818*. 2012. DOI:10.48550/arXiv.1209.4818
55. Rowshan M., Viterbo E. Stepped List Decoding for Polar Codes. *Proceedings of the 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing, ISTC, China, 03–07 December 2018, Hong Kong*. IEEE; 2018. DOI:10.1109/ISTC.2018.8625267
56. Zhu K., Wu Z. Comprehensive Study on CC-LDPC, BC-LDPC and Polar Code. *Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, WCNCW, 06–09 April 2020, Seoul, South Korea*. IEEE; 2020. DOI:10.1109/WCNCW48565.2020.9124897. EDN:XOIQZR
57. Wehn N., Sahin O., Herrmann M. Forward-Error-Correction for Beyond-5G Ultra-High Throughput Communications. *Proceedings of the 11th International Symposium on Topics in Coding, ISTC, 30 August – 03 September 2021, Montreal, Canada*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/ISTC49272.2021.9594126
58. Ren Y., Zhang L., Shen Y., Song W., Boutillon E., Balatsoukas-Stimming A., et al. Edge-Spreading Raptor-Like LDPC Codes for 6G Wireless Systems. *arXiv:2410.16875*. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2410.16875
59. Ren Y., Shen Y., Song W., Balatsoukas-Stimming A., Boutillon E., Burg A. Towards 6G: Configurable High-Throughput Decoder Implementation for SC-LDPC Codes. *Proceedings of the 58th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 27–30 October 2024, Pacific Grove, USA*. IEEE; 2024. p.980–984. DOI:10.1109/IEEECONF60004.2024.10942947
60. Hashemi S.A., Condo C., Gross W.J. Fast and Flexible Successive-Cancellation List Decoders for Polar Codes. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2017;65(21):5756–5769. DOI:10.1109/TSP.2017.2740204
61. Wang C-X., You X., Gao X., Zhu X., Li Z., Zhang C., et al. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023;25(2):905–974. DOI:10.1109/COMST.2023.3249835. EDN:WXUFKU
62. Akbar M.S., Hussain Z., Ikram M., Sheng Q.Z., Mukhopadhyay S. On challenges of sixth-generation (6G) wireless networks: A comprehensive survey of requirements, applications, and security issues. *Journal of Network and Computer Applications*. 2024;236:104040. DOI:10.1016/j.jnca.2024.104040. EDN:OWJCF5
63. Matsumine T., Ochiai H. Recent Advances in Deep Learning for Channel Coding: A Survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024;5:2666–2693. DOI:10.1109/ojcoms.2024.3472094. EDN:TZENCY
64. Geiselhart M., Krieg F., Clausius J., Tandler D., ten Brink S. 6G: A Welcome Chance to Unify Channel Coding? *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023;3(1):67–80. DOI:10.1109/MBITS.2023.3322974
65. Yan Y., Zhu J., Zheng T., He J., Jiang C., He J., et al. Error correction code transformer: From non-unified to unified. *arXiv:2410.03364*. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2410.03364
66. Shen L., Wu Y., Xu Y., You X., Gao X., Zhang W. GLDPC-PC Codes: Channel Coding Toward 6G Communications. *IEEE Communications Magazine*. 2025;63(10):165–171. DOI:10.1109/MCOM.005.2400259

67. Qiao W., Liu D., Liu S. QFEC ASIP: A Flexible Quad-Mode FEC ASIP for Polar, LDPC, Turbo, and Convolutional Code Decoding. *IEEE Access*. 2018;6:72189–72200. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2883292
68. Yue Y., Choi S., Ajayi T., Wei X., Dreslinski R., Blaauw D., et al. A Fully Configurable Unified FEC Decoder for LDPC, Polar, Turbo, and Convolutional Codes with Row-First Collision-Free Compression. *Authorea Preprints*. 2024. DOI:10.36227/techrxiv.171262833.36139863/v1

Список источников

1. Zhang H., Tong W. Channel Coding for 6G Extreme Connectivity – Requirements, Capabilities, and Fundamental Tradeoffs // IEEE BITS the Information Theory Magazine. 2023. Vol. 3. Iss. 1. PP. 54–66. DOI:10.1109/MBITS.2023.3322978
2. Lu Y., Zheng X. 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues // Journal of Industrial Information Integration. 2020. Vol. 19. P. 100158. DOI:10.1016/j.jii.2020.100158. EDN:BIOOJV
3. Zong B., Fan C., Wang X., Duan X., Wang B., Wang J. 6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2019. Vol. 14. Iss. 3. PP. 18–27. DOI:10.1109/MVT.2019.2921398
4. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1 // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'93, Geneva, Switzerland, 23–26 May 1993). IEEE, 1993. Vol. 2. PP. 1064–1070. DOI:10.1109/ICC.1993.397441
5. Yue C., Miloslavskaya V., Shirvanimoghaddam M., Vucetic B., Li Y. Efficient Decoders for Short Block Length Codes in 6G URLLC // IEEE Communications Magazine. 2023. Vol. 61. Iss. 4. PP. 84–90. DOI:10.1109/MCOM.001.2200275. EDN:PULBIK
6. Rowshan M., Qiu M., Xie Y., Gu X., Yuan J. Channel Coding Toward 6G: Technical Overview and Outlook // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2024. Vol. 5. PP. 2585–2685. DOI:10.1109/OJCOMS.2024.3390000. EDN:WBHYCS
7. Miao S., Kestel C., Johannsen L., Geiselhart M., Schmalen L., Balatsoukas-Stimming A., et al. Trends in Channel Coding for 6G // Proceedings of the IEEE. 2024. Vol. 112. Iss. 7. PP. 653–675. DOI:10.1109/JPROC.2024.3416050
8. Gautam A., Thakur P., Singh G. Advanced channel coding schemes for B5G/6G networks: State-of-the-art analysis, research challenges and future directions // International Journal of Communication Systems. 2024. Vol. 37. Iss. 13. P. e5855. DOI:10.1002/dac.5855. EDN:WMSPSO
9. Gallager R. Low-density parity-check codes // IRE Transactions on Information Theory. 1962. Vol. 8. Iss. 1. PP. 21–28. DOI:10.1109/TIT.1962.1057683
10. Chen L., Xu J., Djurdjevic I., Lin S. Near-Shannon-limit quasi-cyclic low-density parity-check codes // IEEE Transactions on Communications. 2004. Vol. 52. Iss. 7. PP. 1038–1042. DOI:10.1109/TCOMM.2004.831353
11. Fosstorier M.P. Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices // IEEE Transactions on Information Theory. 2004. Vol. 50. Iss. 8. PP. 1788–1793. DOI:10.1109/TIT.2004.831841
12. Li M., Derudder V., Bertrand K., Desset C., Bourdoux A. High-Speed LDPC Decoders Towards 1 Tb/s // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2021. Vol. 68. Iss. 5. PP. 2224–2233. DOI:10.1109/TCSI.2021.3060880. EDN:UTRSUU
13. Tanner R. A recursive approach to low complexity codes // IEEE Transactions on Information Theory. 1981. Vol. 27. Iss. 5. PP. 533–547. DOI:10.1109/TIT.1981.1056404
14. Zhu H., Pu L., Xu H., Zhang B. Construction of Quasi-Cyclic LDPC Codes Based on Fundamental Theorem of Arithmetic // Wireless Communications and Mobile Computing. 2018. P. 5264724. DOI:10.1155/2018/5264724
15. Vatta F., Soranzo A., Babich F. Low-complexity bound on irregular LDPC belief-propagation decoding thresholds using a Gaussian approximation // Electronics Letters. 2018. Vol. 54. Iss. 17. PP. 1038–1040. DOI:10.1049/el.2018.0478
16. MacKay D.J., Neal R.M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes // Electronics Letters. 1997. Vol. 33. Iss. 6. PP. 457–458. DOI:10.1049/el:19961141
17. Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2009. Vol. 55. Iss. 7. PP. 3051–3073. DOI:10.1109/TIT.2009.2021379
18. Tal I., Vardy A. List Decoding of Polar Codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2015. Vol. 61. Iss. 5. PP. 2213–2226. DOI:10.1109/TIT.2015.2410251
19. Niu K., Chen K. CRC-Aided Decoding of Polar Codes // IEEE Communications Letters. 2012. Vol. 16. Iss. 10. PP. 1668–1671. DOI:10.1109/LCOMM.2012.090312.121501
20. Kestel C., Herrmann M., Wehn N. When Channel Coding Hits the Implementation Wall // Proceedings of the 2018 IEEE 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing (ISTC, Hong Kong, China, 03–07 December 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/ISTC.2018.8625324
21. Sarkis G., Giard P., Vardy A., Thibeault C., Gross W.J. Fast Polar Decoders: Algorithm and Implementation // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32. Iss. 5. PP. 946–957. DOI:10.1109/JSAC.2014.140514
22. Giard P., Sarkis G., Thibeault C., Gross W.J. Multi-Mode Unrolled Architectures for Polar Decoders // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2016;63(9):1443–1453. DOI:10.1109/TCSI.2016.2586218
23. Alamdar-Yazdi A., Kschischang F.R. A Simplified Successive-Cancellation Decoder for Polar Codes // IEEE Communications Letters. 2011. Vol. 15. Iss. 12. PP. 1378–1380. DOI:10.1109/LCOMM.2011.101811.111480
24. Tong J., Wang X., Zhang Q., Zhang H., Wang J., Tong W. Fast polar codes for terabits-per-second throughput communications // Proceedings of the 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC, Toronto, Canada, 05–08 September 2023). IEEE, 2023. DOI:10.1109/PIMRC56721.2023.10293973
25. Ghanaatian R., Balatsoukas-Stimming A., Müller T.C., Meidlinger M., Matz G., Teman A., Burg A. A 588-Gb/s LDPC Decoder Based on Finite-Alphabet Message Passing // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2017. Vol. 26. Iss. 2. PP. 329–340. DOI:10.1109/TVLSI.2017.2766925

26. Amirzade F., Sadeghi M.-R., Panario D. QC-LDPC Codes With Large Column Weight and Free of Small Size ETSS // IEEE Communications Letters. 2021. Vol. 26. Iss. 3. PP. 500–504. DOI:10.1109/LCOMM.2021.3138936. EDN:GIEZGG
27. Farsiabi A., Banihashemi A.H. Error Floor Analysis of LDPC Row Layered Decoders // IEEE Transactions on Information Theory. 2021. Vol. 67. Iss. 9. PP. 5804–5826. DOI:10.1109/TIT.2021.3099020. EDN:IWPNIO
28. Liu X., Wu S., Wang Y., Zhang N., Jiao J., Zhang Q. Exploiting Error-Correction-CRC for Polar SCL Decoding: A Deep Learning-Based Approach // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. 2019. Vol. 6. Iss. 2. PP. 817–828. DOI:10.1109/TCCN.2019.2946358. EDN:LEXLB
29. Liu Y., Olmos P.M., Mitchell D.G. Generalized LDPC Codes for Ultra Reliable Low Latency Communication in 5G and Beyond // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 72002–72014. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2880997
30. Wang T., Qu D., Jiang T. Parity-check-concatenated polar codes // IEEE Communications Letters. 2016. Vol. 20. Iss. 12. PP. 2342–2345. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2880997. EDN:OYJXQ
31. Asif M., Khan W.U., Afzal H.R., Nebhen J., Ullah I., Rehman A.U., Kaabar M.K. Reduced-Complexity LDPC Decoding for Next-Generation IoT Networks // Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. DOI:10.1155/2021/2029560. EDN:TRRDM
32. Niu K. Advanced Channel Coding for 6G // In: Lin X., Zhang J., Liu Y., Kim J. (eds.) Fundamentals of 6G Communications and Networking. Springer, 2023. PP. 259–290. DOI:10.1007/978-3-031-37920-8_10
33. Herrmann M., Wehn N., Thalmaier M., Fehrenz M., Lehnigk-Emden T., Alles M. A 336 Gbit/s Full-Parallel Window Decoder for Spatially Coupled LDPC Codes // Proceedings of the Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit, Porto, Portugal, 08–11 June 2021). IEEE, 2021. PP. 508–513. DOI:10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482457
34. Kam D., Kong B.Y., Lee Y. Low-Latency SCL Polar Decoder Architecture Using Overlapped Pruning Operations // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2023. Vol. 70. Iss. 3. PP. 1417–1427. DOI:10.1109/TCSI.2022.3230589. EDN:XPVRKY
35. Tai Y., Li K., Zhou L., Liu S., Zhang X. An Improved CA-SCL Decoding Algorithm for Polar Code // Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC, Shenzhen, China, 19–22 July 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/ISNCC55209.2022.9851768
36. Kim B., Park I.-C. Area-Efficient QC-LDPC Decoder Architecture Based on Stride Scheduling and Memory Bank Division // IEICE Transactions on Communications. 2013. Vol. E96. Iss. 7. PP. 1772–1779. DOI:10.1587/transcom.E96.B.1772
37. Bezner P., Clausius J., Geiselhart M., Janz T., Krieg F., Obermüller S., et al. Towards Flexible LDPC Coding for 6G // Proceedings of the 58th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Pacific Grove, USA, 27–30 October 2024). IEEE, 2024. PP. 1119–1125. DOI:10.1109/IEEECONF60004.2024.10942769
38. Bae J.H., Abotabl A., Lin H.-P., Song K.-B., Lee J. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications // APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. 2019. Vol. 8. Iss. 1. P. e17. DOI:10.1017/ATSIP.2019.10
39. Alqudah A.A., Hayajneh K.F., Aldiabat H.A., Shakhatreh H.M. Efficient Generation of Puncturing-Assisted Rate-Matched 5G New Radio LDPC Codes for Faster-Than-Nyquist Signaling // Journal of Communications. 2024. Vol. 19. Iss. 2. PP. 90–98. DOI:10.12720/jcm.19.2.90-98. EDN:UUKNAC
40. Nguyen C.T., Le H.D., Nguyen C.T., Pham A.T. Toward Practical HARQ-Based RC-LDPC Design for Optical Satellite-Assisted Vehicular Networks // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2024. Vol. 60. Iss. 6. PP. 8619–8634. DOI:10.1109/TAES.2024.3434768
41. Yuan R., Xie T., Jin Y. Dynamic Maximum Iteration Number Scheduling LDPC Decoder for Space-Based Internet of Things // Proceedings of the 5th EAI International Conference on IoT as a Service (IoTaaS 2019, Xi'an, China, 16–17 November 2019). Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer, 2020. Vol. 316. PP. 235–241. DOI:10.1007/978-3-030-44751-9_20
42. Korada S.B., Şaşoğlu E., Urbanke R. Polar Codes: Characterization of Exponent, Bounds, and Constructions // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. Iss. 12. PP. 6253–6264. DOI:10.1109/TIT.2010.2080990
43. Hassani S.H., Urbanke R. Universal polar codes // Proceedings of the 2014 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT, Honolulu, USA, 29 June – 04 July 2014). IEEE, 2014. PP. 1451–1455. DOI:10.1109/ISIT.2014.6875073
44. Sun S., Zhang Z. Designing Practical Polar Codes Using Simulation-Based Bit Selection // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2017. Vol. 7. Iss. 4. PP. 594–603. DOI:10.1109/JETCAS.2017.2759253. EDN:YEMWHJ
45. Miloslavskaya V., Li Y., Vucetic B. Frozen Set Design for Precoded Polar Codes // IEEE Transactions on Communications. 2024. Vol. 73. Iss. 1. PP. 77–92. DOI:10.1109/TCOMM.2024.3439431
46. Zhu H., Zhao Y. A Mapping Shortening Algorithm for Polar Codes // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 87110–87117. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2926739. EDN:BLYVAC
47. Zhu H., Guan P., Cao Z., Zhao Y. Rate-compatible systematic polar codes // IET Communications. 2021. Vol. 15. Iss. 15. PP. 1930–1940. DOI:10.1049/cmu2.12204. EDN:OTVRFX
48. Trifonov P., Miloslavskaya V. Polar codes with dynamic frozen symbols and their decoding by directed search // Proceedings of the 2013 IEEE Information Theory Workshop (ITW, Seville, Spain, 09–13 September 2013). IEEE, 2013. DOI:10.1109/ITW.2013.6691213. EDN:SLLYAP
49. Miloslavskaya V., Li Y., Vucetic B. Design of Compactly Specified Polar Codes With Dynamic Frozen Bits Based on Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Communications. 2023. Vol. 72. Iss. 3. PP. 1257–1272. DOI:10.1109/TCOMM.2023.3331532. EDN:LHWQVZ
50. Coşkun M.C., Durisi G., Jerkovits T., Liva G., Ryan W., Stein B., et al. Efficient error-correcting codes in the short blocklength regime // Physical Communication. 2019. Vol. 34. PP. 66–79. DOI:10.1016/j.phycom.2019.03.004. EDN:XBHNSP
51. Zhong X., Sham C.-W., Ma S.L., Chou H.-F., Mostaani A., Vu T.X., et al. Joint Source-Channel Coding System for 6G Communication: Design, Prototype and Future Directions // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 72034–72046. DOI:10.1109/

ACCESS.2024.3360003. EDN:FJYGPJ

52. Herrmann M., Wehn N. Beyond 100 Gbit/s Pipeline Decoders for Spatially Coupled LDPC Codes // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2022. P. 90. DOI:10.1186/s13638-022-02169-5. EDN:JHMSIO

53. Li H., Yu Z., Lu T., Zheng W., Feng H., Ma Z., et al. Novel memory efficient LDPC decoders for beyond 5G // Physical Communication. 2022. Vol. 51. P. 101538. DOI:10.1016/j.phycom.2021.101538. EDN:KGHOML

54. Presman N., Litsyn S. Recursive Descriptions of Polar Codes // arXiv:1209.4818. 2012. DOI:10.48550/arXiv.1209.4818

55. Rowshan M., Viterbo E. Stepped List Decoding for Polar Codes // Proceedings of the 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing (ISTC, Hong Kong, China, 03–07 December 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/ISTC.2018.8625267

56. Zhu K., Wu Z. Comprehensive Study on CC-LDPC, BC-LDPC and Polar Code // Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW, Seoul, South Korea, 06–09 April 2020). IEEE, 2020. DOI:10.1109/WCNCW48565.2020.9124897. EDN:XOIQZR

57. Wehn N., Sahin O., Herrmann M. Forward-Error-Correction for Beyond-5G Ultra-High Throughput Communications // Proceedings of the 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC, Montreal, Canada, 30 August – 03 September 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/ISTC49272.2021.9594126

58. Ren Y., Zhang L., Shen Y., Song W., Boutillon E., Balatsoukas-Stimming A., et al. Edge-Spreading Raptor-Like LDPC Codes for 6G Wireless Systems // arXiv:2410.16875. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2410.16875

59. Ren Y., Shen Y., Song W., Balatsoukas-Stimming A., Boutillon E., Burg A. Towards 6G: Configurable High-Throughput Decoder Implementation for SC-LDPC Codes // Proceedings of the 58th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Pacific Grove, USA, 27–30 October 2024). IEEE, 2024. PP. 980–984. DOI:10.1109/IEEECONF60004.2024.10942947

60. Hashemi S.A., Condo C., Gross W.J. Fast and Flexible Successive-Cancellation List Decoders for Polar Codes // IEEE Transactions on Signal Processing. 2017. Vol. 65. Iss. 21. PP. 5756–5769. DOI:10.1109/TSP.2017.2740204

61. Wang C-X., You X., Gao X., Zhu X., Li Z., Zhang C., et al. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25. Iss. 2. PP. 905–974. DOI:10.1109/COMST.2023.3249835. EDN:WXUFGU

62. Akbar M.S., Hussain Z., Ikram M., Sheng Q.Z., Mukhopadhyay S. On challenges of sixth-generation (6G) wireless networks: A comprehensive survey of requirements, applications, and security issues // Journal of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 236. P. 104040. DOI:10.1016/j.jnca.2024.104040. EDN:OWJCF5

63. Matsumine T., Ochiai H. Recent Advances in Deep Learning for Channel Coding: A Survey // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2024. Vol. 5. PP. 2666–2693. DOI:10.1109/ojcoms.2024.3472094. EDN:TZENCY

64. Geiselhart M., Krieg F., Clausius J., Tandler D., ten Brink S. 6G: A Welcome Chance to Unify Channel Coding? // IEEE BITS the Information Theory Magazine. 2023. Vol. 3. Iss. 1. PP. 67–80. DOI:10.1109/MBITS.2023.3322974

65. Yan Y., Zhu J., Zheng T., He J., Jiang C., He J., et al. Error Correction Code Transformer: From Non-Unified to Unified // arXiv:2410.03364. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2410.03364

66. Shen L., Wu Y., Xu Y., You X., Gao X., Zhang W. GLDPC-PC Codes: Channel Coding Toward 6G Communications // IEEE Communications Magazine. 2025. Vol. 63. Iss. 10. PP. 165–171. DOI:10.1109/MCOM.005.2400259

67. Qiao W., Liu D., Liu S. QFEC ASIP: A Flexible Quad-Mode FEC ASIP for Polar, LDPC, Turbo, and Convolutional Code Decoding // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 72189–72200. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2883292

68. Yue Y., Choi S., Ajayi T., Wei X., Dreslinski R., Blaauw D., et al. A Fully Configurable Unified FEC Decoder for LDPC, Polar, Turbo, and Convolutional Codes with Row-First Collision-Free Compression // Authorea Preprints. 2024. DOI:10.36227/techrxiv.171262833.36139863/v1

Статья поступила в редакцию 31.08.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.

The article was submitted 31.08.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.

Информация об авторах:

**ЧЖАН
Вэйцзя**

инженер кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
 <https://orcid.org/0000-0003-2252-2750>

**ГАЗИЗОВ
Тальгат Рашитович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
 <https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 004.7+004.738.2: 004.738.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73>

EDN:GXFZLX



Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС

✉ Александр Александрович Березкин, berezkin.aa@sut.ru

✉ Роман Михайлович Вивчарь, vivchar.rm@sut.ru

✉ Александр Александрович Ченский, chenskii.aa@sut.ru

✉ Руслан Валентинович Киричек, kirichek@sut.ru

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

Аннотация

В работе исследуется зависимость величин прикладной задержки и потери кадров FPV-видеопотока от размера передаваемых кадров, сжатых нейросетевым кодеком, при реализации каналов информационного обмена между беспилотными воздушными судами и станцией внешнего пилота в космическом сегменте гибридной орбитально-наземной сети связи. Рассмотрены спутниковые каналы информационного обмена, построенные на базе спутниковых группировок низкой околоземной орбиты Starlink, а также геостационарных орбит Ямал-402 и Ямал-601. **Актуальность** работы обусловлена необходимостью достижения заданного уровня качества услуги FPV-управления в спутниковых сетях связи.

Используемые методы. Прикладные задержки передачи и потери кадров видеопотока при использовании нейросетевых кодеков измерены методом натурных испытаний. Кадры видеопотока сегментируются, передаются по транспортному протоколу UDP и восстанавливаются. Плотность распределения вероятности задержек восстанавливается методом Розенблатта – Парзена с функцией оценки плотности с Гауссовым ядром.

Результаты. Получены средние задержки передачи и потерь кадров видеопотока (сжатых нейросетевым кодеком) через спутниковые системы связи на низкой околоземной и геостационарных орбитах. Восстановлены распределения зависимостей задержек видеопотока от размера полезной нагрузки. Найден характер распределения задержки видеопотока, сжатого нейросетевым кодеком. **Новизна** полученных результатов заключается в исследовании характера задержек видеопотока при реализации услуги FPV-управления через различные космические сегменты гибридной орбитально-наземной сети связи при использовании нейросетевых кодеков сжатия видеопотока.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании прикладных спутниковых каналов информационного обмена для реализации услуги FPV-управления с целью формирования оптимальной конфигурации используемых нейросетевых кодеков.

Ключевые слова: задержка видеопотока, кадры видеопотока, каналы информационного обмена, беспилотное воздушное судно, беспилотная авиационная система, управление от первого лица, FPV-управление, спутниковая система связи, Starlink, Ямал-402, Ямал-601

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, «Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения» (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1).

Ссылка для цитирования: Березкин А.А., Вивчарь Р.М. Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 60–73. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73. EDN:GXFZLX

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73>

EDN:GXFZLX

Research of Video Stream Frame Delay in UAVs FPV-Control Information Exchange Channel of HSTNs Space Segment

 **Alexandr A. Berezkin** , berezkin.aa@sut.ru

 **Roman M. Vivchar**, vivchar.rm@sut.ru

 **Alexandr A. Chenskiy**, chenskii.aa@sut.ru

 **Ruslan V. Kirichkek**, kirichkek@sut.ru

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

Annotation

*In this paper, dependence of applied delay and video stream frame loss values of the FPV video stream on the size of the transmitted frames compressed by a neural network codec when implementing information exchange channels between unmanned aerial vehicles and an external pilot station in the space segment of a hybrid orbital-ground communication network. Satellite information exchange channels built on the basis of the Starlink Low-Earth orbit satellite constellations, as well as the Yamal-402 and Yamal-601 geostationary orbits, are considered. **Relevance** of the work is based on the necessity to achieve a specified level of quality of FPV control services in satellite communication networks.*

Methods used. Application delay and frame loss of the video stream using neural network codecs are measured using the field testing method. Video stream frames are segmented, transmitted via the UDP transport protocol and reconstructed. The probability distribution density of delays is reconstructed using the Rosenblatt-Parzen method with a density estimation function with a Gaussian kernel.

Results. Average transmission delays and frame losses of a video stream (compressed by a neural network codec) via satellite communication systems in low-Earth and geostationary orbits are obtained. Distributions of video stream delay dependencies on the payload size are reconstructed. The nature of the distribution of video stream delays compressed by a neural network codec is found. **Novelty** of the obtained results lies in the study of the nature of video stream delays when implementing the FPV control service through various space segments of a hybrid orbital-ground communication network using neural network video stream compression codecs.

Practical significance. The results can be used in modeling applied satellite information exchange channels for implementing the FPV control service in order to form an optimal configuration of the neural network codecs used.

Keywords: video stream latency, information link, channel of data exchange, channel of in-information exchange, UAV, unmanned aerial system, first person view control, FPV-control, LEO, GEO

Funding: The research was prepared with the financial support of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, grant agreement No. 071-03-2025-005, "Applied scientific research in the field of creation and development of telemetry, control and communication systems for unmanned aircraft systems for the period up to 2030, taking into account import displacement" (reg. No. of applied scientific research: 1024032900105-1).

For citation: Berezkin A.A., Vivchar R.M., Chenskiy A.A., Kirichkek R.V. Research of Video Stream Frame Delay in UAVs FPV-Control Information Exchange Channel of HSTNs Space Segment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):60–73. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73. EDN:GXFZLX

Введение

Управление беспилотными воздушными судами (БВС) от первого лица позволяет выполнять такие задачи, как мониторинг сельскохозяйственных

угодий [1–3] и строительных площадок [4, 5]. Такой вид управления предполагает отправку видеопотока, отражающего полетную обстановку, и данных телеметрии на станцию внешнего пилота

(ВП), а также команд управления в обратном направлении. В связи с тем, что управляющее воздействие в направлении БВС при FPV-управлении формируется ВП на основе кадров видеопотока, полученных на прикладном уровне услуги FPV-управления, то задержка кадров FPV-видео является критически важным параметром для корректного формирования команд управления, соответствующих реальной полетной обстановке. Поэтому оценку качества услуги FPV-управления следует проводить на прикладном уровне модели OSI, где линии связи с землей и бортом в совокупности образуют каналы информационного обмена (КИО) [6–9]. Следует отметить, что по КИО между БВС и станцией ВП также передается и служебный сетевой трафик [10]. Наибольший объем данных при этом занимает информация, необходимая для восстановления кадров видеопотока.

Команды управления БВС формируются внешним пилотом на основе качества и оперативности видеопотока, а также телеметрической информации. Оперативность информации, в свою очередь, зависит от прикладной задержки (от появления события до отображения его на экране монитора или очков). Данному термину соответствует зарубежные термины «G2G latency» [11–13] или «G2G delay» [14–16] (*аббр. от англ. Glass-to-Glass latency/delay* – задержка от «стекла к стеклу»). Соответственно, измерение прикладной задержки видеопотока, которая рассматривается в настоящей работе, является актуальной задачей.

К протоколам управления и передачи телеметрии относятся: SBus, ASBUS, iBus, SumD, SumH, PPM, PWM, CRSF, JetiExBus, DSM2 и DSMX, XBUS, XBee, FrSky, SmartPort, HoTT, LTM, MavLink, SRXL и SRXL2, UAVTalk, Mutiwii [17, 18]. К телеметрии также можно отнести и систему идентификации БВС на основе архитектуры цифровых объектов (DOA, *аббр. от англ. аббр. Digital Object Architecture*) [19, 20]. При этом, несмотря на высокую интенсивность трафика команд управления и телеметрии, большая полоса пропускания для передачи этого вида трафика в общем случае не требуется. Исключение составляет случай, когда в составе телеметрической информации передаются большие объемы сенсорных данных.

Видеопоток – это временная последовательность кадров (изображений) определенного формата. Для FPV-видеопотока применяется ряд форматов: телевизионные стандарты PAL (*аббр. от англ. Phase Alternate Line* – фазовая альтернативная линия) [21] разрешением 720×576; NTSC (*аббр. от англ. National Television System Committee* – национальный комитет по телевизионным системам) [22] разрешением 720×480 [23]; SECAM (*аббр. от англ. Sequential Colour Memory* – последовательная цветовая память) разрешением

720(768)×576 [24, 25], а также цифровые системы передачи видео FPV-управления с разрешением 1280×720 (HD) и 1920×1080 (FullHD) [26]. Интенсивность видеопотока отличается для разных систем. Так, по стандартам PAL и SECAM в секунду передается 25 кадров, а по стандартам NTSC – 30. Система FPV-управления Connex Prosight HD имеет интенсивность видеопотока FPS = 30 к/с, а Insight SE – FPS ∈ {30; 60} к/с. Отдельные системы поддерживают 120 FPS.

Как известно, для хранения кадра видеопотока разрешения HD палитры RGB в несжатом виде требуется около 379 Кб. Для передачи таких кадров видеопотока с интенсивностью 30 к/с необходима полоса пропускания КИО в 74 Мбит/с. Для ослабления требования по полосе пропускания используются видеокодеки, обеспечивающие адаптивное сжатие кадров видеопотока. К стандартным видеокодекам относятся: AVC/H264 (*аббр. от англ. Advanced Video Coding*) [27], HEVC/H265 (*аббр. от англ. High Efficiency Video Codec*) [28], VCC/H266 (*аббр. от англ. Versatile Video Codec*) [29], VP8 [30], VP9 [31] и AV1 (*аббр. от англ. AOMedia Video 1*) [32]. Помимо стандартных видеокодеков, разрабатываются нейросетевые видеокодеки [33–40]. Они применяются для сильного сжатия кадров видеопотока при работе в низкоскоростных каналах связи. В настоящей работе рассматриваются нейросетевые видеокодеки.

Как правило, FPV-управление осуществляется по радиоканалам (в частности, LoRa [41]) и через сотовые сети связи. Использование радиоканала ограничивает дальность FPV-управления. Беспроводные сотовые сети связи, в свою очередь, сильно ограничены зоной покрытия. Так, согласно исследованию французской компании nPerf, на 11 июня 2025 г. мобильные сети 2G, 3G, 4G и 5G покрывают около 20 % территории Российской Федерации (рисунок 1 – на примере оператора Megafon, <https://www.nperf.com/ru/map/RU/-/157235.MTS-Mobile/signal?ll=68.65655498475738&lg=41.74804687500001&zoom=3>).

Согласно Стратегии развития отрасли связи РФ до 2035 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р «Об утверждении Стратегии развития отрасли связи РФ на период до 2035», гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) (рисунок 2) позволят управлять БВС на территории всей Российской Федерации [42]. Данная разновидность сетей состоит из двух сегментов: наземного и космического. В части управления БВС наземный сегмент состоит из сотовых и магистральных сетей связи. Космический (орбитальный) сегмент состоит из спутниковых сетей связи, которые основываются на ОГ космических аппаратов (КА).

Спутниковые сети связи характеризуются высоким уровнем задержек передачи данных, которые

возникают по причине того, что сигналу необходимо преодолеть значительные расстояния. Так как ОГ КА могут располагаться на низкой околоземной орбите (НОО) [43], средней околоземной орбите (СОО) [44], высокой околоземной орбите (ВОО) [45] и геостационарной орбите (ГСО) [46], то эти расстояния соответственно принимают значения от 200 до 1500 км над экватором – для НОО, от 1500 до 35 786 км – для средней околоземной орбиты; 35 786 – для ГСО; свыше 35 786 км – для ВОО [47].

Кроме того, спутниковые соединения являются нестабильными, из-за чего помимо высоких задержек возникают потери пакетов [48].

Настоящее исследование является продолжением работы [42]. В ней рассматриваются зависимости задержек и потерь передачи кадров видеопотока, сжатых нейросетевыми видеокодеками, от размера передаваемой полезной нагрузки по спутниковым сетям связи (НОО и ГСО).

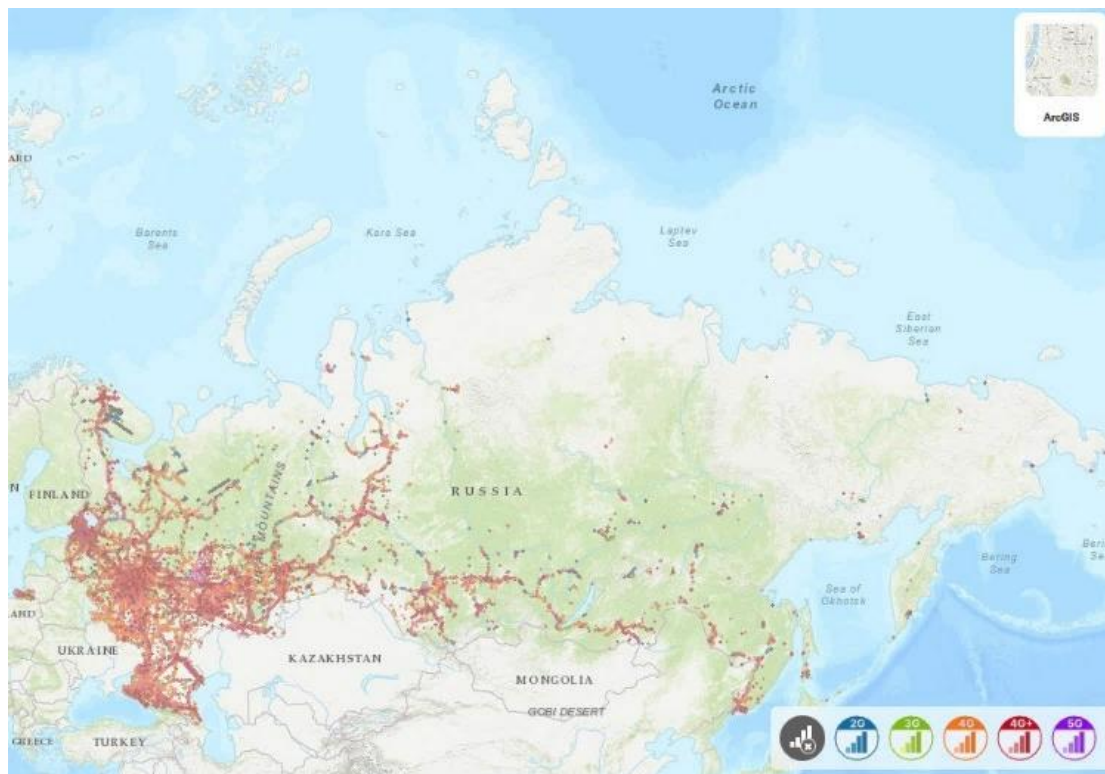


Рис. 1. Карта покрытия мобильных сетей оператора МегаФон

Fig. 1. Mobile Networks Coverage Map for Megafon



Рис. 2. Структура ГОНСС для FPV-управления БВС

Fig. 2. HSTNs Structure for UAVs FPV-Control

Описание эксперимента

Для исследования влияния размера кадров видеопотока на величину прикладной задержки и уровень потерь кадров в КИО космического сегмента ГОНСС были проведены натурные испытания. В качестве КИО космического сегмента для ОГ на НОО применяется система Старлинк [49], а для ОГ на ГСО: Ямал-402, Ямал-601 [50]. Структурная схема эксперимента приведена на рисунке 3.

Трафик для тестирования ОГ на НОО передавался через морской терминал ОГ «Старлинк» из акватории Средиземного моря, выгружался через наземную станцию приема (Starlink Gateway Station) в районе Бухареста и передавался через Интернет в Санкт-Петербург. В качестве спутникового абонентского терминала использовался терминал «Starlink Maritime» (рисунок 4а).

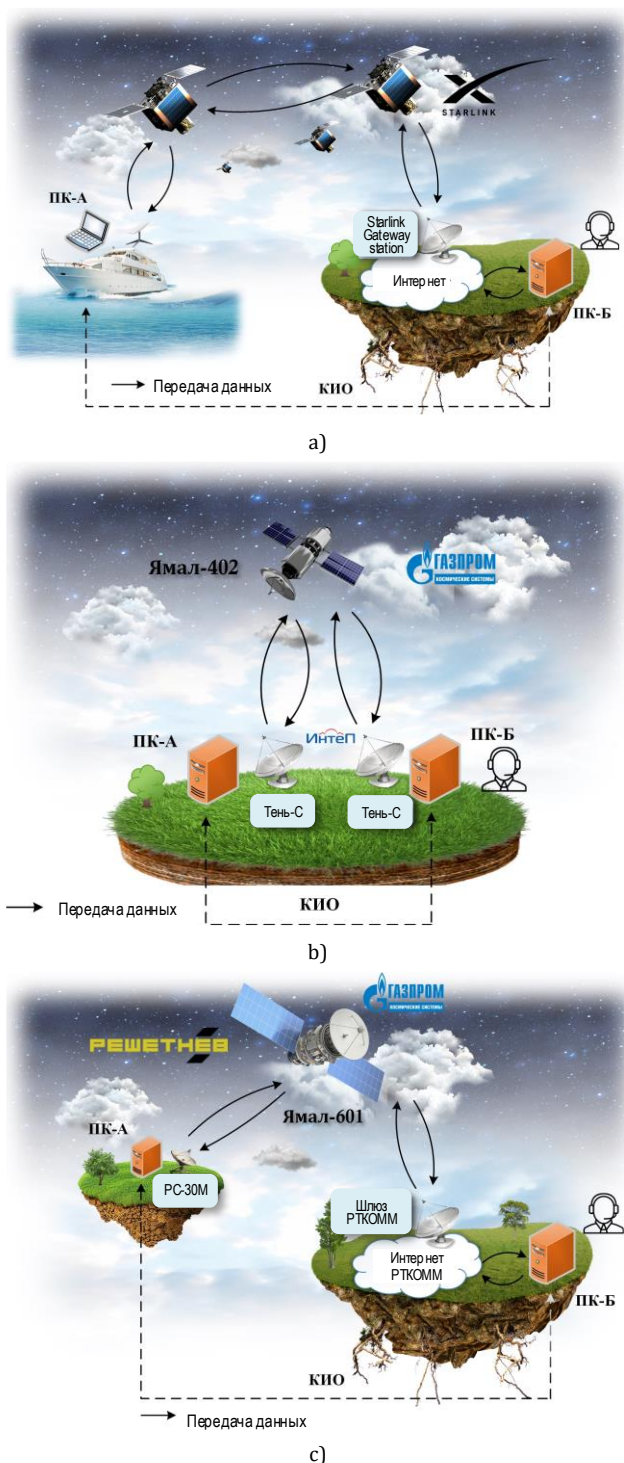


Рис. 3. Структурная схема эксперимента: а) Старлинк; б) Ямал-402; в) Ямал-601

Fig. 3. Structural Diagram of the Experiment: a) Starlink; b) Yamal-402; c) Yamal-601

Для тестирования прикладных задержек в КИО ОГ на ГСО использовался абонентский терминал СПС «Тень-С» (рисунок 4б) разработки ООО «КБ «Интеллектуальные приборы» (<https://intep.pro>), работающий со спутником Ямал-402 в *Ku*-диапазоне, а также абонентский терминал спутниковой связи РС-30М на базе спутникового модема Gilat

SkyEdge CPE (рисунок 4с) разработки ИСС «РЕШЕТНЁВ» (<https://www.iss-reshetnev.ru>), работающий со спутником Ямал-601 в *Ka*-диапазоне. Трафик передавался и принимался в Санкт-Петербурге. Скорости нисходящих и восходящих каналов передачи данных представлены в таблице 1.



а)



б)



в)

Рис. 4. Абонентские терминалы: а) Starlink Maritime; б) Тень-С; в) РС-30М

Fig. 4. Satellite Terminals: a) Starlink Maritime; б) Shadow-S; в) RS-30M

ТАБЛИЦА 1. Скорости каналов выгрузки и загрузки
TABLE 1. Upload and Download Channel Speeds

Терминал	Нисходящий канал (Download)	Восходящий канал (Upload)	Диапазон частот
Starlink Maritime	131 Мбит/с	31 Мбит/с	<i>Ku</i>
Тень-С	14 Кбит/с	14 Кбит/с	<i>Ku</i>
РС-30М	23 Мбит/с	1,76 Мбит/с	<i>Ka</i>

Задержка в КИО прикладного уровня (мс) оценивается в [42] как:

$$t_{\text{кио}} = t_c + t_p + t_{dp},$$

где t_c – сетевая задержка; t_p – задержка инкапсуляции кадров видеопотока; t_{dp} – задержка декапсуляции кадров видеопотока.

Потери пакетов (%) оцениваются по выражению:

$$\text{loss} = \frac{\text{frame}}{\text{all_frame}},$$

где frame – количество успешно принятых и восстановленных на станции ВП кадров; all_frame – количество отправленных с БВС кадров.

Пакеты, которые не удалось получить в течение 5 секунд (тайм-аут подключения), считаются потерянными. Натурные испытания проводятся в соответствии с методикой, описанной в [42].

Результаты эксперимента

В результате проведенного эксперимента были получены плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ Ямал-402 (рисунки 5а, 5с, 5е, 5г) и Ямал-601 (рисунки 5б, 5д, 5ф, 5h) при разной величине полезной нагрузки. Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина прикладной задержки подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения при любых вариантах полезных нагрузок, где параметры усечения равны границам области допустимых значений величины прикладной задержки.

Для проверки гипотезы о подчинении величины прикладной задержки усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения был использован критерий согласия Колмогорова – Смирнова [51].

Обработка результатов эксперимента позволила также определить интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, которые принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} 1 \leq \alpha \leq 4,5, \\ 1 \leq \beta \leq 4. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные интервалы (1) изменения параметров бета-распределения согласуются с полученными ранее в исследовании [42] параметрами формы закона распределения величины прикладной задержки в КИО при FVP-управлении БВС при использовании наземного сегмента ГОНСС.

Для определения характеристик закона бета-распределения [52] были использованы следующие выражения [42]:

$$t_{\text{кио}}^{\text{нв}} = t_{\text{кио}}^{\text{мин}} + (t_{\text{кио}}^{\text{макс}} - t_{\text{кио}}^{\text{мин}}) \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2}, \quad (2)$$

$$\sigma = (t_{\text{кио}}^{\text{макс}} - t_{\text{кио}}^{\text{мин}}) \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)\sqrt{\alpha + \beta + 1}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{кио}}^{\text{нв}}$ и σ – наиболее вероятная величина задержки и ее среднеквадратическое отклонение, определяемое из выборки.

Выражения (2) и (3) позволяют на основе статистических данных о наиболее вероятном, минимальном и максимальном значениях величины прикладной задержки определить параметры бета-распределения, такие как α и β , которые в дальнейшем могут быть использованы для моделирования прикладной задержки в канале информационного обмена. Исходя из этого, при моделировании КИО, представляющего собой ОГ КА на ГСО, целесообразно в качестве закона распределения величины прикладной задержки использовать бета-распределение с параметрами (1).

Графики зависимости величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки по КИО, представляющему собой ОГ КА Ямал-601 и Ямал-402 приведены на (рисунке 6) и показывают, что в случае использования в качестве КИО Ямал-601 зависимость величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки имеет вид логарифмической возрастающей функции, а в случае применения Ямал-402 – возрастающей линейной функции. При этом при использовании в качестве КИО Ямал-601 величина прикладной задержки резко возрастает (от 340 до 600 мс) на интервале полезной нагрузки от 100 до 1000 байт, а на интервале от 1000 до 15000 байт ее изменение имеет слабовыраженный вид (от 600 до 800 мс).

В результате проведенного эксперимента также были получены плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» при разной величине полезной нагрузки. Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина прикладной задержки при передаче полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 3000 байт подчиняется также усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения (рисунки 7а, 7с, 7е, 7г).

Интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, полученные с использованием выражений (2), (3), принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} 0,3 \leq \alpha \leq 3,6, \\ 0,8 \leq \beta \leq 4. \end{aligned} \quad (4)$$

Важно отметить, что в большинстве случаев значения параметров α и β принимают приблизительно равные значения, что позволит сделать вывод о приближении закона распределения величины прикладной задержки к нормальному.

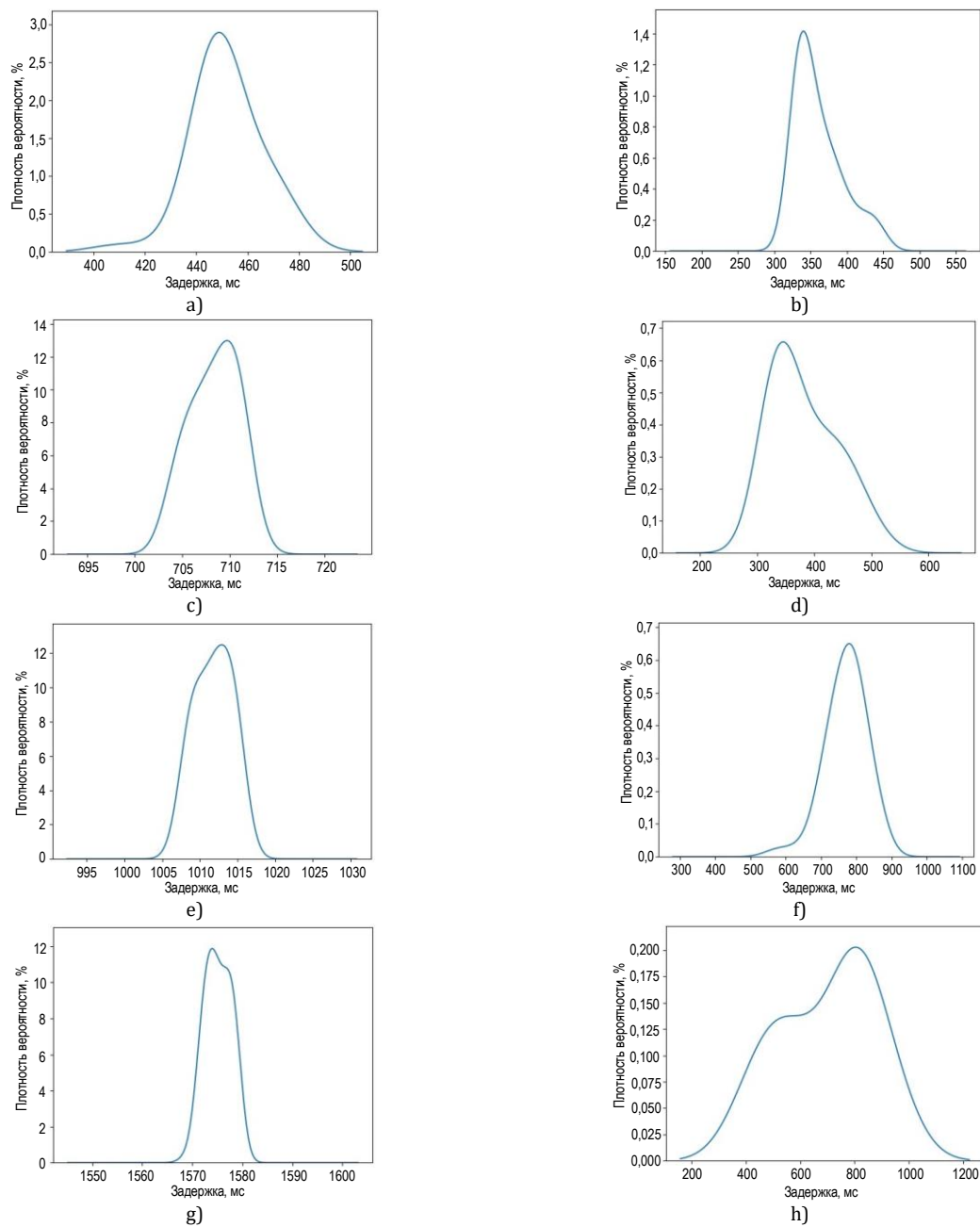


Рис. 5. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО Ямал-402 (слева) и Ямал-601 (справа) при разной величине полезной нагрузки: 100 байт (а и б); 500 байт (с и д); 1000 байт (е); 2000 байт (ф и г); 15000 байт (h)

Fig. 5. Probability Densities of The Applied Delay Value When Using Yamal-402 (Left) and Yamal-601 (Right) as an Information Exchange Channel (IEC) with Different Payload Values: 100 bytes (a and b); 500 bytes (c and d); 1000 bytes (e); 2000 bytes (f and g); 15000 bytes (h)

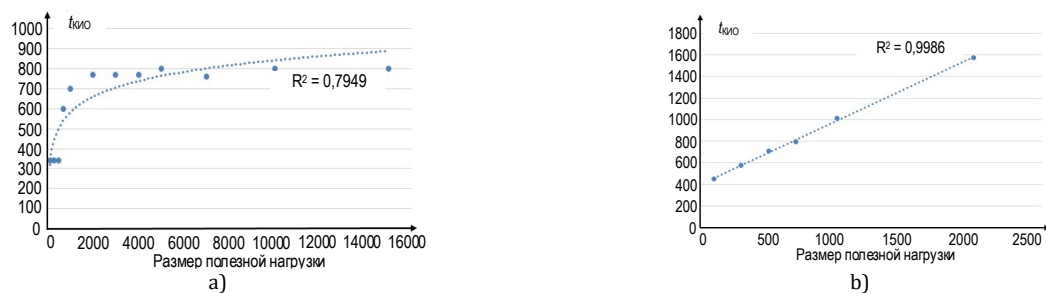


Рис. 6. Зависимость размера прикладной задержки КИО от размера передаваемой полезной нагрузки для Ямал-601 (а) и Ямал-402 (б)

Fig. 6. Dependence of the Applied Delay Size of the IEC on the Size of the Transmitted Payload for Yamal-601 (a) and Yamal-402 (b)

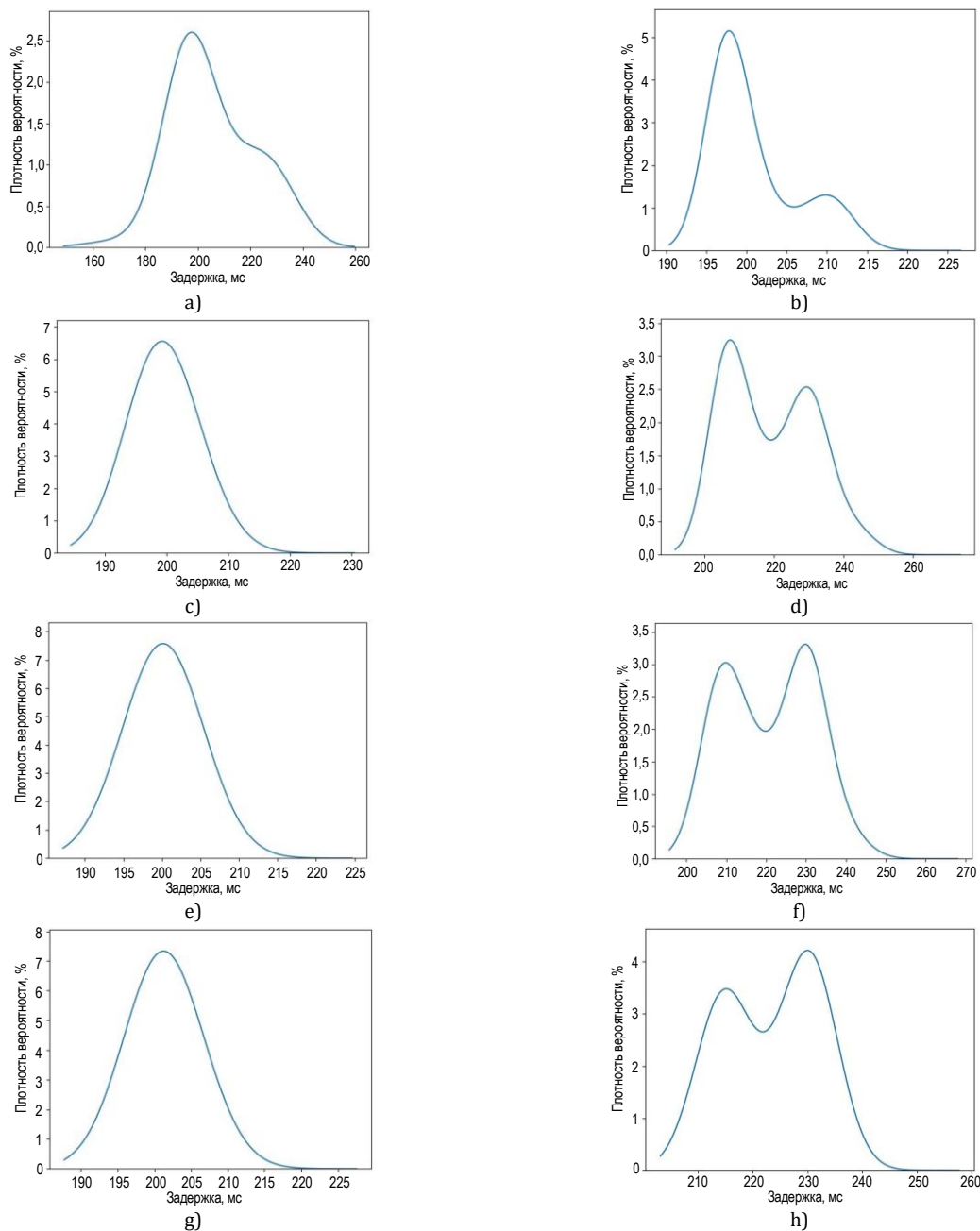


Рис. 7. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» при величине полезной нагрузки от 100 до 3000 байт (слева) и от 3000 до 15000 байт (справа)

Fig. 7. Probability Densities of the Application Delay Value When Using the Starlink as IEC with a Payload Value from 100 to 3000 Bytes (Left) and from 3000 to 15000 Bytes (Right)

В свою очередь, обработка результатов эксперимента при передаче полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт показала, что в таких случаях закон распределения прикладной задержки имеет двухмодульный вид (рисунки 7b, 7d, 7f, 7h). Закон распределения величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» и передаче полезной нагрузки в интервале от 3000 до 15000 байт представляет собой смесь нормальных распределений (рисунок 8).

Плотность вероятности величины прикладной задержки, являющаяся смесью двух нормальных распределений, представлена формулой:

$$f(t_{\text{кио}}) = af_1(t_{\text{кио}}) + bf_2(t_{\text{кио}}), \quad (5)$$

где a и b – весовые коэффициенты.

Параметры законов распределения $f_1(t_{\text{кио}})$, $f_2(t_{\text{кио}})$ при изменении величины передаваемой полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт остаются неизменными и равны соответственно:

$$\begin{aligned} m_1 &= 205 \text{ мс}, \sigma_1 = 3 \text{ мс}, \\ m_2 &= 230 \text{ мс}, \sigma_2 = 10 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (6)$$

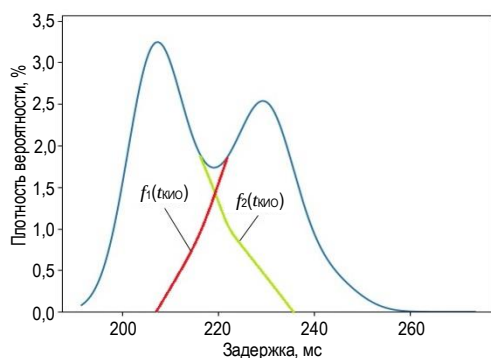


Рис. 8. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ Старлинк как смесь двух нормальных распределений

Fig. 8. Probability Densities of the Applied Delay Value When Using the Starlink as IEC as a Mixture of Two Normal Distributions

В свою очередь, вес каждого закона распределения при изменении величины полезной нагрузки изменяется. Так, при изменении полезной нагрузки от 3000 до 7000 байт наиболее весомым является закон распределения $f_1(t_{\text{кио}})$, а от 7000 до 15000 байт – $f_2(t_{\text{кио}})$.

Для определения весовых коэффициентов a и b был использован метод максимального правдоподобия. Основанием для выбора метода максимального правдоподобия является сравнительная простота и минимальные вычислительные ресурсы, необходимые для вычисления параметров смеси распределений, состоящих из двух нормальных распределений с известными параметрами. Также для этой цели могут быть использованы сеточный ЕМ-алгоритм и метод скользящего разделения смесей.

Исследования по результатам проведенного эксперимента зависимости потери кадров от величины передаваемой полезной нагрузки позволили сделать следующие выводы:

- при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-402 потери кадров при изменении полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 1000 байт являются незначительными и составляют менее 0,5 %, при значении полезной нагрузки 2000 байт возрастают до 8,5 %, а при увеличении полезной нагрузки свыше 2000 байт составляют 100 %, что обусловлено низкой скоростью передачи;

- при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-601 и «Старлинк» изменение потери кадров при варьировании полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт не имеют ярко выраженной зависимости, средние значения потери кадров составляют 1,3 и 5,2 %, соответственно.

В таблице 2 представлены обобщенные результаты проведения эксперимента.

Пусть к системе FPV-управления предъявляется требование по задержке: не менее P % кадров должны поступать с БВС на СВП с задержкой, не

превышающей $t_{\text{кио}}^{\text{пред}}$, – а также применяется нейросетевой кодек, в котором для передачи видеопотока используются только кадры, для декодирования которых достаточно информации, передаваемой по КИО [33–39]. Тогда при использовании j -й конфигурации нейросетевого кодека кадры видеопотока имеют средний размер $MSize_j$ с низким среднеквадратическим отклонением [36, 37]. Задержки передачи кадров видеопотока, закодированных j -й конфигурацией нейросетевого кодека, при передаче через спутниковый сегмент ГОНСС можно аппроксимировать как сумму времени кодирования t_c , времени декодирования t_{dc} и времени передачи $t_{\text{кио}}$, имеющего плотность распределения вероятности $f(t_{\text{кио}})$. Следовательно, необходимо, чтобы задержки передачи по КИО были меньше величины $t_{\text{кио}}^{\text{пред}} - t_c - t_{dc}$.

Оптимальной конфигурацией нейросетевого кодека для передачи видеопотока при удовлетворении требований по величине задержки является такая, при которой выполняется условие:

$$\int_0^{t_{\text{кио}}^{\text{пред}} - t_c - t_{dc}} f(t_{\text{кио}}) dt \geq P,$$

при наименьшем $Msize$.

ТАБЛИЦА 2. Параметры законов распределения

TABLE 2. Parameters of Distribution Laws

ОГ КА	α	β	μ_1 / μ_2	σ_1 / σ_2	a	b
Ямал-601	[1,4.5]	[1,4]	–	–	–	–
Ямал-402	[1,4.5]	[1,4]	–	–	–	–
Старлинк 100–3000 байт	[0.3,3.6]	[0.8,4]	–	–	–	–
Старлинк 3000 байт	–	–	205/230	3/10	0.82	0.18
Старлинк 4000 байт	–	–	205/230	3/10	0.78	0.22
Старлинк 5000 байт	–	–	205/230	3/10	0.71	0.29
Старлинк 7000 байт	–	–	205/230	3/10	0.62	0.38
Старлинк 10000 байт	–	–	205/230	3/10	0.47	0.53
Старлинк 15000 байт	–	–	205/230	3/10	0.41	0.59

Таким образом, полученные знания о законах распределения величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ Ямал-402, Ямал-601, «Старлинк» при различных полезных нагрузках могут быть использованы для определения оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков, а также для моделирования КИО для передачи FPV-видеопотока космического сегмента ГОНСС с целью определения параметров КИО, позволяющих обеспечить максимум показателей эффективности их функционирования.

Заключение

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

Во-первых, при использовании в качестве КИО ОГ КА на ГСО величина прикладной задержки подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения.

Во-вторых, при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-601 зависимость величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки имеет вид логарифмической возрастающей функции, а в случае использования Ямал-402 – возрастающей линейной функции.

В-третьих, при использовании в качестве КИО ОГ КА на НОО и изменении полезной нагрузки от 100 до 3000 байт величина прикладной задержки подчиняется нормальному закону распределения.

В-четвертых, при использовании в качестве КИО ОГ КА на НОО и изменении полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт закон распределения величин

прикладной задержки имеет бимодальный вид и представляет собой смесь двух нормальных законов распределения с неизменными параметрами и различными весовыми коэффициентами.

Учет полученных результатов при моделировании функционирования КИО позволит осуществить выбор оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков с целью повышения эффективности функционирования КИО. Кроме этого, полученные результаты могут быть полезны при организации каналов FPV-управления на основе стандартных видеокодеков.

Полученные результаты позволяют повышать эффективность выбора конфигураций нейросетевых кодеков для передачи видеопотока FPV-управления по спутниковому сегменту ГОНСС. Кроме того, результаты могут применяться при моделировании космического сегмента ГОНСС, построенного на основе различных орбитальных группировок космических аппаратов.

Список источников

1. Лукаев С.Л., Емельянов Н.А., Смирнов М.П. К вопросу дистанционного зондирования беспилотными летательными аппаратами в сельском хозяйстве // VI Международная научно-практическая конференция «Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Чебоксары, Российская Федерация, 15 ноября 2022 г.). Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. С. 632–635. EDN:INDGLM
2. Хабибуллин И.И., Сахарова В.В., Сабиров Б.М. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве Российской Федерации // Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция молодых ученых «Прикладные исследования в агроинженерии» (Казань, Российская Федерация, 22 ноября 2023 г.). Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2024. С. 263–268. EDN:VSZMPJ
3. Кунин И.Е. Беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве // XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, Российская Федерация, 23–24 октября 2023 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 117–121. EDN:EXZBEG
4. Глижинская Е.А. Использование беспилотных летательных аппаратов (дронов) в строительстве // Сборник статей магистрантов и аспирантов строительного факультета. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 106–112. EDN:BXIYTL
5. Кудасова А.С., Тютин А.Д., Сокольников Э.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 31–38. EDN:ZSBCJR
6. Моисеева Н.А. Методы структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств // Международная молодежная конференция, приуроченная к 90-летию СГТУ имени Гагарина Ю.А. «Современные материалы и технологии» (Саратов, Российская Федерация, 27–28 мая 2020 г.). Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. С. 32–34. EDN:YXRPHY
7. Моисеев Д.В., Моисеева Н.А., Чужикова-Проскурнина О.Д. Реализация надёжных каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром с высокой пропускной способностью // Сборник научных трудов «Морская стратегия и политика России в контексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке». Севастополь: ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, 2020. Т. 4(25). С. 258–262. EDN:EYEFHS
8. Моисеев Д.В., Моисеева Н.А., Чужикова-Проскурнина О.Д. Обеспечение надежности и высокой пропускной способности каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром // III Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании и аграрном производстве» (Брянск, Российская Федерация, 18 марта 2020 г.). Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2020. С. 309–314. EDN:FDAYNQ
9. Chao H., Maheshwari A., Sudarsanan V., Tamaskar S., DeLaurentis D.A. UAV Traffic Information Exchange Network // Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (Atlanta, Georgia, 25–29 June 2018). 2018. P. 3347. DOI:10.2514/6.2018-3347
10. de Resende H.C., Pinheiro J.F.N., Reiter P., Both C.B., Marquez-Barja J.M. 4G/5G performance of a multi-RAT UAV for medical parcel delivery // Proceedings of the 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC, Las Vegas, USA, 08–11 January 2022). IEEE, 2022. PP. 268–271. DOI:10.1109/CCNC49033.2022.9700528
11. Vijayaratnam M., Cagnazzo M., Valenzise G., Trioux A., Kieffer M. Towards Zero-Latency Video Transmission Through Frame Extrapolation // Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP, Bordeaux, France, 18 October 2022). IEEE, 2022. PP. 2122–2126. DOI:10.1109/ICIP46576.2022.9897958

12. Bachhuber C., Steinbach E. A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication // Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP, Phoenix, USA, 25–28 September 2016). IEEE, 2016. PP. 2132–2136. DOI:10.1109/ICIP.2016.7532735
13. Bachhuber C., Steinbach E. A System for Precise End-to-End Delay Measurements in Video Communication // arXiv:1510.01134. 2015. DOI:10.48550/arXiv.1510.01134
14. Bachhuber C., Steinbach E., Freundl M., Reisslein M. On the Minimization of Glass-to-Glass and Glass-to-Algorithm Delay in Video Communication // IEEE Transactions on Multimedia. 2017. Vol. 20. Iss. 1. PP. 238–252. DOI:10.1109/TMM.2017.2726189
15. Kanj H., Trioux A., Cagnazzo M., Coudoux F.X., Corlay P., Kieffer M. Glass-to-Glass Delay Reduction: Encoding Rate Reduction vs. Video Frame Extrapolation // Proceedings of the 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP, Poitiers, France, 27–29 September 2023). IEEE, 2023. PP. 1–6. DOI:10.1109/MMSP59012.2023.10337718
16. Bachhuber C., Steinbach E. Are Today's Video Communication Solutions Ready for the Tactile Internet? // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW, San Francisco, USA, 19–22 March 2017). IEEE, 2017. PP. 1–6. DOI:10.1109/WCNCW.2017.7919060
17. Kumar R. Autonomous Control of Advanced Multirotor Unmanned Aerial Systems. PhD Thesis. University of Cincinnati, 2022.
18. Ebeid E., Skriver M., Terkildsen K.H., Jensen K., Schultz U.P. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators // Microprocessors and Microsystems. 2018. Vol. 61. PP. 11–20. DOI:10.1016/j.micpro.2018.05.002
19. Al-Bahri M., Yankovsky A., Borodin A., Kirichek R. Testbed for Identify IoT-Devices Based on Digital Object Architecture // Proceedings of the 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2018), and 11th Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2018), St. Petersburg, Russian Federation, 27–29 August 2018. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2018. Vol. 11118. PP. 129–137. DOI:10.1007/978-3-030-01168-0_12. EDN:YAPAZN
20. Al-Bahri M., Yankovsky A., Kirichek R., Borodin A. Smart System Based on DOA & IoT for Products Monitoring & Anti-Counterfeiting // Proceedings of the 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC, Muscat, Oman, 15–16 January 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/ICBDSC.2019.8645610. EDN:TENQWL
21. Loughlin B.D. The PAL color television system // IEEE Transactions on Broadcast and Television Receivers. 1966. Vol. 12. Iss. 3. PP. 153–158.
22. Rec. ITU-R BT.470-7 (1970-1974-1986-1994-1995-1998). Conventional Television Systems.
23. Куйдин Р.А., Панин Д.В., Павлова Ю.Е., Палов П.В. Аналоговое и цифровое FPV // Материалы XXX Международной научно-практической конференции, Анапа, Российская Федерация, 12 мая 2021 г. «Наука. Образование. Инновации». Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2021. С. 113–116. EDN:JLXBKT
24. Townsend G.B. Colour performance of the Secam colour television system // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1963. Vol. 110. Iss. 8. PP. 1341–1349. DOI:10.1049/piee.1963.0190
25. Suzuki Y., Gai T., Yamakawa M., Sugiyama H. NTSC/PAL/SECAM digital video decoder with high-precision resamplers // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2005. Vol. 51. Iss. 1. PP. 287–294. DOI:10.1109/TCE.2005.1405734
26. Singh S., Lee H.W., Tran T.X., Zhou Y., Sichert M.L., Güvenç I. FPV Video Adaptation for UAV Collision Avoidance // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2021. Vol. 2. PP. 2095–2110. DOI:10.1109/ojcoms.2021.3106274. EDN:ADCYJS
27. Rec. ITU-T H.264 (03/2003). Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services.
28. ISO/IEC 23008 2:2013 (12/2013). Information technology. High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments. Part 2. High Efficiency Video Coding.
29. Rec. ITU-T H.266 (09/2023). Versatile Video Coding.
30. Bankoski J., Koleszar J., Quillio L., Salonen J., Wilkins P., Xu Y. VP8 Data Format and Decoding Guide. RFC 6386. 2011. DOI:10.17487/rfc6386
31. Grange A., de Rivaz P., Hunt J. VP9 Bitstream & Decoding Process Specification – v0.6. Google, Inc., 2016.
32. de Rivaz P., Haughton J. AV1 Bitstream & Decoding Process Specification. The Alliance for Open Media, 2018.
33. Ченский А.А., Березкин А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 46–56. DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
34. Ченский А.А., Березкин А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // Электросвязь. 2024. № 6. С. 10–16. DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.011. EDN:GPNYSJ
35. Березкин А.А., Ченский А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II // Электросвязь. 2024. № 7. С. 26–35. DOI:10.34832/ELSV.2024.56.7.005. EDN:NZSTKD
36. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 28–37. DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
37. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59–69. DOI:10.34832/ELSV.2024.59.10.009. EDN:IWGJLY
38. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть I. Модели и методика // Электросвязь. 2024. № 12-2. С. 32–45. DOI:10.34832/ELSV.2024.61.12.005. EDN:PDIIJE
39. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть II. Обучение моделей и эксперименты // Электросвязь. 2025. № 5. С. 34–41. DOI:10.34832/ELSV.2025.67.5.005. EDN:HBJWPP

40. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., et al. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression // arXiv:2502.20762. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.20762
41. Kirichek R., Pham V.D., Kolehkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa // Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2017), and 3d Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2017), and Third International Workshop on Nano-scale Computing and Communications, NsCC 2017, St. Petersburg, Russian Federation, 28–30 August 2017. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2017. Vol. 1053. PP. 708–720. DOI:10.1007/978-3-319-67380-6_67. EDN:ZHIASL
42. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 7–17. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17. EDN:FTRJGU
43. Jamalipour A. Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks. Artech House, Inc., 1997. 273 p.
44. Xia Z., Liu L., Hu C., Bu X. Inter-Satellite Link Channel Characterization of Laser Communication Systems // Proceedings of the 11th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN, Xi'an, China, 17–20 August 2023). IEEE, 2023. PP. 426–431. DOI:10.1109/ICICN59530.2023.10393617
45. Dong C., Li X. Design of a Data Distribution System for High Earth Orbit Satellites // Proceedings of the 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE, Xi'an, China, 25–27 October 2024). IEEE, 2024. PP. 1615–1619. DOI:10.1109/ICEMCE64157.2024.10862589
46. Roberts L.D. A lost Connection: Geostationary Satellite Networks and the International Telecommunication Union // Berkeley Technology Law Journal. 2000. Vol. 15. Iss. 3. P. 1095 DOI:10.15779/Z38DQ1J
47. Гриценко А.А. Спутниковые системы класса HTS // Connect. 2017. № 4. С. 120.
48. Li J., Li H., Lai Z., Wu Q., Liu Y., Zhang Q., et al. SatGuard: Concealing Endless and Bursty Packet Losses in LEO Satellite Networks for Delay-Sensitive Web Applications // Proceedings of the ACM Web Conference 2024 (Singapore, Singapore, 13–17 May 2024). New York: Association for Computing Machinery, 2024. PP. 3053–3063. DOI:10.1145/3589334.3645639
49. Michel F., Trevisan M., Giordano D., Bonaventure O. A first look at Starlink performance // Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference (Nice, France, 25–27 October 2022). New York: Association for Computing Machinery, 2022. PP. 130–136. DOI:10.1145/3517745.356141
50. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П., Сыренова Т.Е., Хахинов В.В. Оптические эффекты полета ракеты-носителя “Протон-М” со спутником Ямал-601 в дальней от места старта зоне // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 2. С. 125–133. DOI:10.31857/S0023420622020054. EDN:RNIXIC
51. Berger V.W., Zhou Y.Y. Kolmogorov–Smirnov Test: Overview // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. John Wiley & Sons, 2014. DOI:10.1002/9781118445112.stat06558
52. Gupta A.K., Nadarajah S. Handbook of Beta Distribution and Its Applications. Boca Raton: CRC press, 2004. 600 p. DOI:10.1201/9781482276596

References

1. Lukaev S.L., Emelyanov N.A., Smirnov M.P. To the question of remote sensing by drones in agriculture. *Proceedings of the Vllth International Scientific and Practical Conference on Scientific, Educational and Applied Aspekts of Production and Processing of Agricultural Products, 15 November 2022, Cheboksary, Russian Federation*. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University Publ.; 2022. p.632–635. (in Russ.) EDN:IHDGLM
2. Habibullin I.I., Saharova V.V., Sabirov B.M. Use of unmanned aerial vehicles (UAV) in agriculture of the Russian Federation. *Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Applied Research in Agricultural Engineering, 22 November 2023, Kazan, Russian Federation*. Kazan: Kazan State Agrarian University Publ.; 2024. p.263–268. (in Russ.) EDN:VSZMPJ
3. Kunin I.E. Unmanned aerial vehicles in agriculture. *Proceedings of the XVth International Youth Forum "Education. Science. Production", 23–24 October 2023, Belgorod, Russian Federation*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Publ.; 2023. p.117–121. (in Russ.) EDN:EXZBEG
4. Glizhinskaja E.A. Utilization of unmanned aerial vehicle (drones) in the construction industry. *A Collection of Articles by Master's and Postgraduate Students of the Faculty of Civil Engineering*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Publ.; 2024. p.106–112. (in Russ.) EDN:BXIYTL
5. Kudasova A.S., Tyutina A.D., Sokolnikova E.V. The use of unmanned aerial vehicles in construction. *Engineering journal of Don*. 2021;8(80):31–38. (in Russ.) EDN:ZSBCJR
6. Moiseeva N.A. Methods of structural synthesis of information exchange channels of unmanned aircraft vehicles. *Proceedings of the International Youth Conference dedicated to the 90th Anniversary of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov on Modern Materials and Technologies, Saratov, Russian Federation, 27–28 May 2020*. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ.; 2020. p.32–34. (in Russ.) EDN:YXRFHY
7. Moiseev D.V., Moiseeva N.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Implementation of reliable channels of information exchange between an unmanned vehicle and a high-capacity dispatch center. *Collection of Scientific Papers on Maritime Strategy and Policy of Russia in the Context of Ensuring National Security and Sustainable Development in the 21st Century, vol.4(25)*. Sevastopol: Nakhimov Black Sea Higher Naval School Publ.; 2020. p.258–262. (in Russ.) EDN:EYEFHS
8. Moiseev D.V., Moiseeva E.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Ensuring reliability and high capacity of information exchange channels between unmanned vehicles and dispatch center. *Proceedings of the IIIrd International Scientific and Practical Conference on Information Technologies in Education and Agricultural Production, 18 March 2020, Bryansk, Russian Federation*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University Publ.; 2020. p.309–314. (in Russ.) EDN:FDAYNQ
9. Chao H., Maheshwari A., Sudarsanan V., Tamaskar S., DeLaurentis D.A. UAV Traffic Information Exchange Network. *Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 25–29 June 2018, Atlanta, Georgia*. 2018. p.3347. DOI:10.2514/6.2018-3347
10. de Resende H.C., Pinheiro J.F.N., Reiter P., Both C.B., Marquez-Barja J.M. 4G/5G performance of a multi-RAT UAV for medical parcel delivery. *Proceedings of the 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference, CCNC, 08–11 January 2022, Las Vegas, USA*. IEEE; 2022. p.268–271. DOI:10.1109/CCNC49033.2022.9700528

11. Vijayaratnam M., Cagnazzo M., Valenzise G., Trioux A., Kieffer M. Towards Zero-Latency Video Transmission Through Frame Extrapolation. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP, 18 October 2022, Bordeaux, France*. IEEE; 2022. p.2122–2126. DOI:10.1109/ICIP46576.2022.9897958
12. Bachhuber C., Steinbach E. A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP, 25–28 September 2016, Phoenix, USA*. IEEE; 2016. p.2132–2136. DOI:10.1109/ICIP.2016.7532735
13. Bachhuber C., Steinbach E. A System for Precise End-to-End Delay Measurements in Video Communication. *arXiv:1510.01134*. 2015. DOI:10.48550/arXiv.1510.01134
14. Bachhuber C., Steinbach E., Freundl M., Reisslein M. On the Minimization of Glass-to-Glass and Glass-to-Algorithm Delay in Video Communication. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2017;20(1):238–252. DOI:10.1109/TMM.2017.2726189
15. Kanj H., Trioux A., Cagnazzo M., Coudoux F.X., Corlay P., Kieffer M. Glass-to-Glass Delay Reduction: Encoding Rate Reduction vs. Video Frame Extrapolation. *Proceedings of the 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing, MMSP, 27–29 September 2023, Poitiers, France*. IEEE; 2023. p.1–6. DOI:10.1109/MMSP59012.2023.10337718
16. Bachhuber C., Steinbach E. Are Today's Video Communication Solutions Ready for the Tactile Internet? *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshops, WCNCW, 19–22 March 2017, San Francisco, USA*. IEEE; 2017. p.1–6. DOI:10.1109/WCNCW.2017.7919060
17. Kumar R. *Autonomous Control of Advanced Multirotor Unmanned Aerial Systems*. PhD Thesis. University of Cincinnati; 2022.
18. Ebeid E., Skriver M., Terkildsen K.H., Jensen K., Schultz U.P. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators. *Microprocessors and Microsystems*. 2018;61:11–20. DOI:10.1016/j.micpro.2018.05.002
19. Al-Bahri M., Yankovsky A., Borodin A., Kirichek R. Testbed for Identify IoT-Devices Based on Digital Object Architecture. *Proceedings of the 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN 2018, and 11th Conference on Internet of Things, Smart Spaces, ruSMART 2018, 27–29 August 2018, St. Petersburg, Russian Federation. Lecture Notes in Computer Science, vol.11118*. Cham: Springer; 2018. p.129–137. DOI:10.1007/978-3-030-01168-0_12. EDN:YAPAZN
20. Al-Bahri M., Yankovsky A., Kirichek R., Borodin A. Smart System Based on DOA & IoT for Products Monitoring & Anti-Counterfeiting. *Proceedings of the 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City, ICBDS, 15–16 January 2019, Muscat, Oman*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/ICBDS.2019.8645610. EDN:TENQWL
21. Loughlin B.D. The PAL color television system. *IEEE Transactions on Broadcast and Television Receivers*. 1966;12(3): 153–158.
22. Rec. ITU-R BT.470-7 (1970-1974-1986-1994-1995-1998). *Conventional Television Systems*.
23. Kuidin R.A., Panin D.V., Pavlova U.E., Palov P.V. Analogue and digital FPV. *Proceedings of the XXXth International Scientific and Practical Conference "Science. Education. Innovations"*, Anapa, Russian Federation, 12 May 2021. Anapa: LLC "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District, 2021. p.113–116. (in Russ.). EDN:JLXBKT
24. Townsend G.B. Colour performance of the Secam colour television system. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1963;110(8):1341–1349. DOI:10.1049/piee.1963.0190
25. Suzuki Y., Gai T., Yamakawa M., Sugiura H. NTSC/PAL/SECAM digital video decoder with high-precision resamplers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2005;51(1):287–294. DOI:10.1109/TCE.2005.1405734
26. Singh S., Lee H.W., Tran T.X., Zhou Y., Sichitiu M.L., Güvenç I. FPV Video Adaptation for UAV Collision Avoidance. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021;2:2095–2110. DOI:10.1109/ojcoms.2021.3106274. EDN:ADCYJS
27. Rec. ITU-T H.264 (03/2003). *Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services*.
28. ISO/IEC 23008 2:2013 (12/2013). *Information technology. High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments. Part 2. High Efficiency Video Coding*.
29. Rec. ITU-T H.266 (09/2023). *Versatile Video Coding*.
30. Bankoski J., Koleszar J., Quillio L., Salonen J., Wilkins P., Xu Y. *VP8 Data Format and Decoding Guide*. RFC 6386. 2011. DOI:10.17487/rfc6386
31. Grange A., de Rivaz P., Hunt J. *VP9 Bitstream & Decoding Process Specification – v0.6*. Google, Inc.; 2016.
32. de Rivaz P., Haughton J. *AV1 Bitstream & Decoding Process Specification*. The Alliance for Open Media; 2018.
33. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of latent video stream compression methods for FPV control of UAVs. *Electrosvyaz*. 2024;6:46–56. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
34. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of latent space quantization methods of variational autoencoder for FPV video stream frames. Part I. *Electrosvyaz*. 2024;6:10–16. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.011. EDN:GPNYSJ
35. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Vivchar R.M., Kirichek R.V. Research of latent space quantization methods of variational autoencoder for FPV video stream frames. Part II. *Electrosvyaz*. 2024;7:26–35. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.56.7.005. EDN:NZSTKD
36. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of neural network codec configurations for adaptive FPV video stream frame compression system when controlling unmanned systems. Part I. Methodology. *Electrosvyaz*. 2024;9:28–37. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
37. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of neural network codec configurations for adaptive fpv video stream frame compression system when controlling unmanned system. Part II. Experiment. *Electrosvyaz*. 2024;10: 59–69. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.59.10.009. EDN:IWGLJY
38. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Masking encrypted FPV video stream when controlling UAVs. Part I. Models and methodology. *Electrosvyaz*. 2024;12-2:32–45. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.61.12.005. EDN:PDIIJE
39. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Masking encrypted FPV video stream when controlling UAVs. Part II: Models training and experiments. *Electrosvyaz*. 2025;5:34–41. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2025.67.5.005. EDN:HBJWPW
40. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., et al. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression. *arXiv:2502.20762*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.20762

41. Kirichek R., Pham V.D., Kolehkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa. *Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2017), and 3d Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2017), and Third International Workshop on Nano-scale Computing and Communications, NsCC 2017, 28–30 August 2017, St. Petersburg, Russian Federation. Lecture Notes in Computer Science, vol.1053*. Cham: Springer; 2017. p.708–720. DOI:10.1007/978-3-319-67380-6_67. EDN:ZHIASL
42. Berezkin A.A., Vivchar R.M., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Research of Video Stream Frame Delay in UAV FPV-Control Information Exchange Channel in Hybrid Communication Network Terrestrial Segment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(1):7–17. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17. EDN:FTRJGU
43. Jamalipour A. *Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks*. Artech House, Inc.; 1997. 273 p.
44. Xia Z., Liu L., Hu C., Bu X. Inter-Satellite Link Channel Characterization of Laser Communication Systems. *Proceedings of the 11th International Conference on Information, Communication and Networks, ICIN, 17–20 August 2023, Xi'an, China*. IEEE; 2023. p.426–431. DOI:10.1109/ICIN59530.2023.10393617
45. Dong C., Li X. Design of a Data Distribution System for High Earth Orbit Satellites. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering, ICEMCE, 25–27 October 2024, Xi'an, China*. IEEE; 2024. p.1615–1619. DOI:10.1109/ICEMCE64157.2024.10862589
46. Roberts L.D. A lost Connection: Geostationary Satellite Networks and the International Telecommunication Union. *Berkeley Technology Law Journal*. 2000;15(3):1095 DOI:10.15779/Z38DQ1J
47. Gritsenko A.A. HTS class satellite systems. *Connect*. 2017;4:120. (in Russ.)
48. Li J., Li H., Lai Z., Wu Q., Liu Y., Zhang Q., et al. SatGuard: Concealing Endless and Bursty Packet Losses in LEO Satellite Networks for Delay-Sensitive Web Applications. *Proceedings of the ACM Web Conference 2024, 13–17 May 2024, Singapore, Singapore*. New York: Association for Computing Machinery; 2024. p.3053–3063. DOI:10.1145/3589334.3645639
49. Michel F., Trevisan M., Giordano D., Bonaventure O. A first look at Starlink performance. *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, 25–27 October 2022, Nice, France*. New York: Association for Computing Machinery; 2022. p.130–136. DOI:10.1145/3517745.356141
50. Mihalev A.V., Beletskij A.B., Lebedev V.P., Syrenova T.E., Hahinov V.V. Optical effects of the Proton-M launch vehicle flight with Yamal-601 satellite in the far zone from the launch site. *Kosmicheskie issledovaniya*. 2022;60(2);125–133. (in Russ.) DOI:10.31857/S0023420622020054. EDN:RNIXIC
51. Berger V.W., Zhou Y.Y. Kolmogorov-Smirnov Test: Overview. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley & Sons; 2014. DOI:10.1002/9781118445112.stat06558
52. Gupta A.K., Nadarajah S. *Handbook of Beta Distribution and Its Applications*. Boca Raton: CRC press; 2004. 600 p. DOI:10.1201/9781482276596

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025; принята к публикации 15.07.2025.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for publication 15.07.2025.

Информация об авторах:

БЕРЕЗКИН
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-1748-8642>

ВИВЧАРЬ
Роман Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

ЧЕНСКИЙ
Александр Александрович

инженер центра перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-0832-8590>

КИРИЧЕК
Руслан Валентинович

доктор технических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-8781-6840>

Киричек Р.В. является главным редактором журнала «Труды учебных заведений связи» с 2023 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Kirichek R.V. has been an editor-in-chief of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" since 2023, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.

Научная статья

УДК 621.396.67.012.12

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-74-83>

EDN:JEJUCM



Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах

✉ Игорь Андреевич Бойко, boiko.ia@sut.ru

✉ Евгений Иванович Глушанков, glushankov.ei@sut.ru

✉ Анна Жановна Лялина, lyalina.az@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Адаптивная обработка сигналов является ключевой технологией в современных спутниковых системах. Ее применение позволяет значительно повысить эффективность работы радиотехнических комплексов за счет улучшения помехозащищенности, увеличения дальности действия. Для реализации пространственной фильтрации в реальном времени используют итерационные алгоритмы адаптации. Анализ существующих разработок показывает, что подавляющее большинство решений основано на алгоритмах наименьших средних квадратов (LMS) и рекурсивных наименьших квадратов (RLS). Популярность этих методов обусловлена их относительной простотой реализации и оптимальными характеристиками в стационарной электромагнитной среде. Однако в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки их эффективность резко снижается, и в этих условиях используют нестационарные алгоритмы на основе фильтра Калмана, среди которых наиболее известными являются алгоритм постоянного модуля на основе несмещенного фильтра Калмана (UKF-CMA) и алгоритм минимальной дисперсии без искажений на основе расширенного фильтра Калмана (EKF-MVDR).

Целью исследования являлось повышение отношения сигнал / шум за счет использования алгоритмов адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах спутниковой связи.

Методы: математическое моделирование адаптивных алгоритмов пространственной фильтрации для спутникового канала связи в среде MATLAB.

В ходе **решения** научной задачи было выполнено исследование устойчивости как стационарных алгоритмов (LMS и RLS), так и нестационарных, основанных на калмановской фильтрации (UKF-CMA, EKF-MVDR, UKF-MVDR), в системе геостационарной спутниковой связи для различных сред, таких как город, пригород и сельская местность. Также для исследуемых алгоритмов был проведен анализ вычислительной сложности, скорости сходимости и выигрышу в отношении сигнал / шум в условиях стационарной и нестационарной сигнально-помеховой обстановки. **Научная новизна** данной работы заключается в предложении модификации алгоритма EKF-MVDR на основе несмещенного фильтра Калмана (UKF-MVDR) для повышения устойчивости алгоритма в условиях нестационарной сигнально-помеховой обстановки применительно к задачам адаптивной обработки сигналов.

Теоретическая значимость работы заключается в использовании алгоритмов пространственной обработки сигналов в геостационарных системах спутниковой связи для обеспечения устойчивой работы в условиях стационарной и динамической сигнально-помеховой обстановки.

Ключевые слова: геостационарные спутниковые системы, адаптивное диаграммообразование, LMS, RLS, UKF-CMA, EKF-MVDR, UKF-MVDR

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области разработки методов мониторинга и идентификация типов трафика для эффективного использования сетевого ресурса в гибридных сетях связи" (регистрационный номер ПТНИ: 1024062100008-4).

Ссылка для цитирования: Бойко И.А., Глушанков Е.И., Лялина А.Ж. Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 74–83. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-74-83. EDN:JEJUCM

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-74-83>

EDN:JEJUCM

Algorithms for Adaptive Signal Processing in Geosynchronous Orbit Satellite Systems

 **Igor A. Boyko** ✉, boiko.ia@sut.ru

 **Evgeniy I. Glushankov**, glushankov.ei@sut.ru

 **Anna Zh. Lyalina**, lyalina.az@sut.ru

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

Annotation

Relevance. Adaptive signal processing is a key technology in modern satellite systems. Its use significantly improves the efficiency of radio engineering systems by improving interference immunity and increasing the operating range. Iterative adaptation algorithms are used to implement spatial filtering in real time. An analysis of existing developments shows that the vast majority of solutions are based on least mean squares (LMS) and recursive least squares (RLS) algorithms. The popularity of these methods is due to their relative simplicity of implementation and optimal characteristics in a stationary electromagnetic environment. However, in a dynamically changing signal-to-noise environment, their effectiveness decreases sharply, and in these conditions, non-stationary algorithms based on the Kalman filter are used, among which the most well-known are the constant modulus algorithm based on the unbiased Kalman filter (UKF-CMA) and the minimum variance distortionless algorithm based on the extended Kalman filter (EKF-MVDR).

The **aim** of the study was to improve the signal-to-noise ratio by using adaptive signal processing algorithms in geostationary satellite communication systems.

The work used **methods** of mathematical modeling of adaptive spatial filtering algorithms for satellite communication channels in the MATLAB environment.

In the **solution** of solving the scientific problem, an analysis of the stability of both stationary algorithms (LMS and RLS) and non-stationary algorithms based on Kalman filtering (UKF-CMA, EKF-MVDR, UKF-MVDR) in a geostationary satellite communication system for various environments, such as urban, suburban, and rural areas. An analysis of computational complexity, convergence speed, and signal-to-noise ratio gain was also performed for the algorithms under study in stationary and non-stationary signal-to-noise conditions.

The scientific **novelty** of this work lies in proposing a modification of the EKF-MVDR algorithm based on an unbiased Kalman filter (UKF-MVDR) to improve the stability of the algorithm in non-stationary signal-to-noise conditions as applied to adaptive signal processing tasks.

The **theoretical significance** of this work lies in the use of spatial signal processing algorithms in geostationary satellite communication systems to ensure stable operation in stationary and dynamic signal-to-noise environments.

Keywords: GEO satellite system, adaptive beamforming, LMS, RLS, UKF-CMA, EKF-MVDR, UKF-MVDR

Funding: The research was prepared with the financial support of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, grant agreement No. 071-03-2025-005, "Applied scientific research in the field of creating services and applications in promising communication networks" (reg. No. of applied scientific research: 1024032900317-4).

For citation: Boyko I.A., Glushankov E.I., Lyalina A.Zh. Algorithms for Adaptive Signal Processing in Geosynchronous Orbit Satellite Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):74–83. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-74-83. EDN:JEJUCM

Введение

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к повсеместному внедрению активных фа-

зированных антенных решеток (АФАР) в качестве базового компонента современных систем. Это обусловлено их уникальными возможностями по

быстрому перестроению диаграммы направленности, адаптивному подавлению помех и усилению сигнала с множества направлений [1, 2].

Например, современные спутниковые системы (Ямал, Экспресс-РВ) активно используют технологии пространственной обработки сигналов для:

- обеспечения глобального покрытия с орбитальной группировки;
- динамического перераспределения пропускной способности;
- противодействия преднамеренным помехам.

Применение АФАР в таких системах позволяет повысить помехозащищенность системы связи в реальном времени в условиях динамического изменения обстановки [3].

Для работы адаптивных алгоритмов необходимы априорные данные о принимаемом сигнале. Алгоритмы, основанные на винеровском решении, в качестве априорных данных используют точную копию образцового сигнала. В качестве такого сигнала могут быть использованы пилот-сигналы. Наряду с генерацией опорного сигнала возможно использование данных о направлении прихода полезного сигнала, такой подход используется в алгоритмах MVDR. Недостатком данных алгоритмов является их низкая надежность даже при небольшом несоответствии угла прихода полезного сигнала предполагаемому априори. Другим методом является слепое формирование луча, который вовсе фактически не требует опорного сигнала. К таким алгоритмам относится, например, алгоритм постоянного модуля (СМА, аббр. от англ. Covariance Matrix Adaptation) [4, 5], который адаптацией диаграммы направленности стремится сохранить известный модуль полезного сигнала.

Отсчеты дискретного сигнала, приходящие на N элементов АФАР, можно рассматривать как сумму всех M полезных сигналов помехи и шума:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{a}_1 d(k) + \mathbf{a}_2 \mathbf{c}(k) + \mathbf{n}(k), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(k)$ – вектор сигналов на элементах АФАР длительностью N ; $\mathbf{a}_1$ – вектор амплитудно-фазового распределения длиной M , определяющая фазовые сдвиги сигнала на апертуре антенны и зависящие от направления источников сигнала; $d(k)$ – полезный сигнал; $\mathbf{c}(k)$ – вектор помех длительностью L ; $\mathbf{a}_2$ – вектор амплитудно-фазового распределения длиной M , определяющий фазовые сдвиги помех на апертуре антенны; $\mathbf{n}(k)$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума длиной M .

Тогда сигнал на выходе АФАР будет равен:

$$y(k) = \mathbf{w}^H(k) \mathbf{x}(k), \quad (2)$$

где $y(k)$ – выходной сигнал; $\mathbf{w}(k)$ – матрица весовых коэффициентов размерностью $N \times M$; H – знак эрмитова сопряжения.

На рисунке 1 представлена структурная схема алгоритма пространственной обработки сигналов (ПОС).

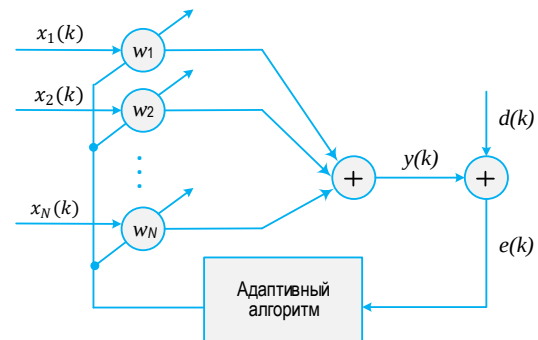


Рис. 1. Структурная схема алгоритма ПОС

Fig. 1. Block Diagram of Algorithm for Spatial Signal Processing

Рассмотрим предлагаемые к исследованию алгоритмы.

LMS

Итеративная процедура поиска оптимального вектора весовых коэффициентов (ВБК) для алгоритма LMS выглядит следующим образом [6, 7]:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu e_k \mathbf{x}_k, \quad (3)$$

где μ – величина шага адаптации; e_k – величина ошибки между выходным сигналом y_k и опорным d_k .

Альтернативным решением данной задачи являются алгоритмы с адаптивным шагом, наиболее известным представителем которых является нормализованный LMS (NLMS).

В NLMS размер шага автоматически корректируется в зависимости от мощности входного сигнала, что обеспечивает более стабильную скорость сходимости независимо от условий работы:

$$\mu_{k+1} = \frac{\mu_0}{\mathbf{x}_k^H \mathbf{x}_k}. \quad (4)$$

RLS

Итеративная процедура поиска оптимального ВБК для алгоритма RLS выглядит следующим образом [1]:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \hat{\mathbf{k}}_{k+1} e_k, \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{k}}_{k+1}$ – вектор усиления Калмана определяемый как:

$$\hat{\mathbf{k}}_{k+1} = \frac{\mathbf{R}_{xx(k)}^{-1} \mathbf{x}_k}{\tau + \mathbf{x}_k^H \mathbf{R}_{xx(k)}^{-1} \mathbf{x}_k}, \quad (6)$$

где τ – коэффициент забывания; $\mathbf{R}_{xx(k)}$ – матрица ковариации сигнала в момент k .

UKF-CMA

В алгоритме слепого диаграммообразования с использованием несмещенного фильтра Калмана (UKF-CMA) в качестве опорного сигнала d_k задается постоянный модуль полезного сигнала.

В данном алгоритме строится следующая модель состояния динамической системы [8]:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{h}}_{k-1} + \mathbf{n}_q, \quad (7)$$

где матрица перехода состояний $\mathbf{F}_k$ размерностью $(M+1) \times (M+1)$ задается как:

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_M & \mathbf{0}_{M \times 1} \\ \mathbf{x}_k^H & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Вектор состояния системы по сравнению с (1) дополняется оценкой выходного сигнала y_{k-1} :

$$\hat{\mathbf{h}}_{k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{k-1} \\ y_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Соответственно, размерность вектора $\hat{\mathbf{h}}_{k-1}$ становится $(M+1) \times 1$.

Вектор шума процесса, предполагаемый как белый гауссовский с нулевым математическим ожиданием и дисперсией q_{k-1} , определяется по выражению:

$$\mathbf{n}_q = \begin{bmatrix} 0 \\ q_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Измерение в момент k можно выразить как:

$$z_k = |\hat{\mathbf{h}}_{k-1}(M+1)|^p. \quad (11)$$

Следовательно, модель измерения можно представить в виде:

$$d_k = |\hat{\mathbf{h}}_{k-1}(M+1)|^p + e_k. \quad (12)$$

Для оценки состояния динамической системы $\hat{\mathbf{h}}_k$ применяется несмещенный фильтр Калмана.

На первом этапе производится выбор параметров детерминированного разброса точек сигматочечного преобразования. Несмещенный фильтр Калмана предполагает три степени свободы α , β и κ .

На основании выбранных параметров производится расчет результирующего коэффициента масштабирования:

$$\lambda = \alpha^2(M + \kappa). \quad (13)$$

Определяются ВВК сигматочечного преобразования размерностью $(2M+3) \times 1$:

$$\mathbf{w}_m = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda + M + 1}, i = 1 \\ \frac{1}{2(\lambda + M + 1)}, i = 2, 3, \dots, 2M + 3 \end{cases}, \quad (14)$$

$$\mathbf{w}_c = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda + M + 1} + 1 + \alpha^2 + \beta, i = 1 \\ w_m^i, i = 2, 3, \dots, 2M + 3 \end{cases}, \quad (15)$$

где i – номер строки соответственного ВВК.

Инициализируются начальные состояния $\hat{\mathbf{h}}_k$ и ковариационной матрицы $\mathbf{P}_k$ как:

$$\hat{\mathbf{h}}_0 = \begin{cases} 1, i = 1 \\ 0, i = 2, 3, \dots, 2M + 3 \end{cases}, \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_0 = \frac{1}{M+1} \mathbf{I}_{M+1}, \quad (17)$$

где $\mathbf{I}_{M+1}$ – единичная матрица размера $(M+1) \times (M+1)$.

Производится расчет матрицы сигматочек размерностью $(M+1) \times (2M+3)$, где i – номер соответствующего столбца матрицы $\mathbf{x}_{k-1}$ (18).

$$\mathbf{x}_{k-1} = \begin{cases} \hat{\mathbf{h}}_{k-1}, i = 1 \\ \hat{\mathbf{h}}_{k-1} + \sqrt{\lambda + M + 1} \cdot \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}}, i = 2, \dots, M + 2 \\ \hat{\mathbf{h}}_{k-1} - \sqrt{\lambda + M + 1} \cdot \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}}, i = M + 2, \dots, 2M + 3 \end{cases}. \quad (18)$$

Далее производится предсказание состояния системы на текущей итерации:

$$\mathbf{H}_k^-[:, i] = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1}[:, i], \quad (19)$$

где $[:, i]$ обозначает i -й столбец матрицы, $i = 1, 2, \dots, 2M + 3$.

Корректируется оценка состояния:

$$\hat{\mathbf{h}}_k^- = \sum_{i=1}^{2M+3} \mathbf{w}_m(i) \mathbf{H}_k^-[:, i], \quad (20)$$

где (i) – i -й элемент вектора.

Выполняется предсказание ковариационной матрицы:

$$\mathbf{P}_k^- = \sum_{i=1}^{2M+3} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-) \times (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-)^H. \quad (21)$$

Осуществляется нелинейное преобразование от сигматочек:

$$\mathbf{Y}_k^-[:, i] = |\mathbf{x}_{k-1}[:, i]|^p, \quad (22)$$

где операция $|\cdot|^p$ производится с каждым элементом i -го столбца, $i = 1, 2, \dots, 2M + 3$.

Производится измерение от сигматочек $\mathbf{Y}_k^-$:

$$\hat{\mathbf{z}}_k^- = \sum_{i=1}^{2M+3} \mathbf{w}_m(i) \mathbf{Y}_k^-[:, i]. \quad (23)$$

Вычисляется матрица взаимной ковариации системы и измерений размерностью $(M+1) \times 1$:

$$\mathbf{C}_k = \sum_{i=1}^{2M+3} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-) \times (\mathbf{Y}_k^-[M+1, i] - \hat{\mathbf{z}}_k^-[M+1])^H. \quad (24)$$

Определяется автокорреляционный параметр s_k :

$$s_k = \sum_{i=1}^{2M+3} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{Y}_k^-[M+1, i] - \hat{\mathbf{Z}}_k^-[M+1, i]) \times (\mathbf{Y}_k^-[M+1, i] - \hat{\mathbf{Z}}_k^-[M+1, i])^H + \delta^2, \quad (25)$$

где

$$\delta^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{\mathbf{z}}_k^-(i) \right)^2. \quad (26)$$

После этого производится вычисление матрицы коэффициентов Калмана размерностью $(M+1) \times 1$:

$$\hat{\mathbf{k}}_k = \mathbf{C}_k s_k^{-1}, \quad (27)$$

обновление весовых коэффициентов:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \hat{\mathbf{h}}_k^- + \hat{\mathbf{k}}_k (d_k - \hat{\mathbf{z}}_k^-(M+1)) \quad (28)$$

и обновление ковариационной матрицы:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- + \hat{\mathbf{k}}_k s_k \hat{\mathbf{k}}_k^H. \quad (29)$$

Затем цикл повторяется, а оптимальный ВВК элементов АФАР вычисляется как:

$$\mathbf{w}_k^{\text{опт}} = \hat{\mathbf{h}}_k[1:M]. \quad (30)$$

EKF-MVDR

В [9] предложен итерационный алгоритм, решающий оптимизационную задачу MVDR на основе расширенного фильтра Калмана второго порядка. Особенностью данного алгоритма является аппроксимация нелинейной функции системы вплоть до второго члена ряда Тейлора при довольно компактных решениях для вычисления матриц Якоби и Гесса, что позволяет алгоритму иметь более высокую устойчивость к накоплению ошибок, чем у алгоритма EKF первого порядка при сохранении вычислительной сложности не более $O(M^3)$.

Оптимизационная задача MVDR формулируется как:

$$\min_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) = E \left[0 - (\mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_k)^2 \right] \quad (31)$$

при условии $J_2(\mathbf{w}_k) = 1$.

В данном случае модель динамической системы будет соответствовать (5), а ковариационную матрицу шума процесса можно представить как:

$$\mathbf{Q} = \delta_n^2 \mathbf{I}_M, \quad (32)$$

где $\mathbf{I}_M$ – единичная матрица $M \times M$; δ_n^2 – дисперсия шума процесса.

С учетом ограничения в (28) задача оптимизации становится двухпараметрической, опорный сигнал можно задать как:

$$\mathbf{d}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Тогда уравнение измерения примет вид:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_k \\ J_2(\mathbf{w}_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1k} \\ n_{2k} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

где n_{1k} и n_{2k} – остаточные и ограничительные ошибки, соответственно, они предполагаются белыми гауссовыми с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями δ_1^2 и δ_2^2 , совместно формирующие ковариационную матрицу измерительного шума:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \delta_1^2 & 0 \\ 0 & \delta_2^2 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Для получения рекуррентной формулы нахождения вектора $\mathbf{w}_k$ используется расширенный фильтр Калмана второго порядка. Вычисляются матрица Якоби $\mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_k)$ размерностью $2 \times M$, а также матрицы Гесса первой $\tilde{\mathbf{H}}_1$ и второй $\tilde{\mathbf{H}}_2$ строк уравнения (30):

$$\mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^H \\ \mathbf{w}_k^H - (\mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k)^H + \mathbf{a}_k^H \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_1 = 0, \quad (37)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{I}_M - \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H, \quad (38)$$

где $\mathbf{I}_M$ – единичная матрица $M \times M$.

Предсказание ковариационной матрицы и измерения вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q}, \quad (39)$$

$$\mathbf{z}_k^- = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_{k-1} \\ J_2(\mathbf{w}_{k-1}) + \frac{1}{2} \text{tr}\{\tilde{\mathbf{H}}_2 \mathbf{P}_k^-\} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

где $\text{tr}\{\cdot\}$ – след матрицы

Определяются матрица взаимных ковариационных параметров системы и измерений размерностью 2×2 :

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_{k-1}) \mathbf{P}_k^- \mathbf{J}\mathbf{w}^H(k, \mathbf{w}_{k-1}) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \times \text{tr}\{\tilde{\mathbf{H}}_2 \mathbf{P}_k^-\} + \mathbf{R}. \quad (41)$$

Матрица коэффициентов Калмана вычисляется как:

$$\hat{\mathbf{k}}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_{k-1}) \mathbf{S}_k^{-1}. \quad (42)$$

Обновление оценки ВВК происходит следующим образом:

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \hat{\mathbf{k}}_k [\mathbf{d}_k - \mathbf{z}_k^-]. \quad (43)$$

Ковариационная матрица ВВК обновляется следующим образом:

$$\mathbf{P}_k = \{\mathbf{I} - \hat{\mathbf{k}}_k \mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_{k-1})\} \mathbf{P}_k^- \times \times \{\mathbf{I} - \hat{\mathbf{k}}_k \mathbf{J}\mathbf{w}(k, \mathbf{w}_{k-1})\}^H + \hat{\mathbf{k}}_k \mathbf{R} \hat{\mathbf{k}}_k^H. \quad (44)$$

UKF-MVDR

Для применения несмещенного фильтра Калмана к задаче оптимизации (31) модифицируем матричное представление модели состояния динамической системы (7). С учетом ограничения направления потребуется расширение вектора состояния системы до $(M + 2)$:

$$\hat{\mathbf{h}}_{k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{j}_2(\mathbf{w}_{k-1}) \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Для использования уравнения направленности (27) в матрице перехода состояний представим его в следующем виде:

$$\mathbf{j}_2(\mathbf{w}_k) = \mathbf{w}_k^H (\mathbf{w}_k - \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k + \mathbf{a}_k) + \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k. \quad (46)$$

Произведем разделение множителя при $\mathbf{w}_k^H$ и слагаемого $\mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k$:

$$\mathbf{j}_2'(\mathbf{w}_k) = \mathbf{w}_k - \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k + \mathbf{a}_k, \quad (47)$$

$$\mathbf{j}_2''(\mathbf{w}_k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k \end{bmatrix}, \quad (48)$$

где $\mathbf{j}_2''(\mathbf{w}_k)$ – вектор $(M + 2) \times 1$ (первые $M + 1$ элемента нулевые).

Тогда матрицу перехода состояний размерностью $(M + 2) \times (M + 2)$ можно задать как:

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_M & 0 & 0 \\ \mathbf{x}_k^H & 0 & 0 \\ \mathbf{j}_2'(\mathbf{w}_{k-1}) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (49)$$

где $\mathbf{I}_M$ – единичная матрица $M \times M$.

А модель состояния динамической системы приобретет вид:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{h}}_{k-1} + \mathbf{j}_2''(\mathbf{w}_{k-1}) + \mathbf{n}_q, \quad (50)$$

где $\mathbf{n}_q$ – белый гауссовский шум с ковариационной матрицей $\mathbf{Q}$.

Модель измерения по сравнению с (23) не претерпевает изменений.

На основании выбранных параметров производится расчет результирующего коэффициента масштабирования $\lambda = \alpha^2 (M + k + 1)$.

Начальное состояние $\hat{\mathbf{h}}_k$ инициализируется как в (28) с учетом расширения вектора состояния:

$$\hat{\mathbf{h}}_0 = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i = 2, 3, \dots, 2M + 5 \end{cases} \quad (51)$$

Начальное состояние $\mathbf{P}_k$ задается равным ковариации шума процесса $\mathbf{Q}$.

Выполняется расчет матрицы сигма-точек (52). Далее производится предсказание состояния системы на текущей итерации (53).

После этого корректируются оценки состояния (54), выполняется предсказание ковариационной матрицы (55) и вычисляется матрица взаимных ковариаций системы и измерений размерностью $(M + 2) \times 2$ (56).

$$\mathbf{x}_{k-1} = \begin{cases} \hat{\mathbf{h}}_{k-1}, & i = 1 \\ \hat{\mathbf{h}}_{k-1} + \sqrt{\lambda + M + 2} \cdot \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}}, & i = 2, \dots, M + 3 \\ \hat{\mathbf{h}}_{k-1} - \sqrt{\lambda + M + 2} \cdot \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}}, & i = M + 4, \dots, 2M + 5 \end{cases}. \quad (52)$$

$$\mathbf{H}_k^-[:, i] = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1}[:, i], i = 1, 2, \dots, 2M + 5. \quad (53)$$

$$\hat{\mathbf{h}}_k^- = \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_m(i) \mathbf{h}_k^-[:, i]. \quad (54)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-) \times (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-)^H + \mathbf{Q}. \quad (55)$$

$$\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-) \times (\mathbf{H}_k^-[M + 1, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M + 1])^H, \\ \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[:, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-) \times (\mathbf{H}_k^-[M + 2, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M + 2])^H \end{bmatrix}. \quad (56)$$

Матрица автокорреляционных параметров $\mathbf{S}_k$ определяется по выражению:

$$\mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} s_{k1} & 0 \\ 0 & s_{k2} \end{bmatrix} + \mathbf{R}, \quad (57)$$

где $\mathbf{R}$ – матрица относительных и остаточных погрешностей аналогичная (43), а s_{k1} и s_{k2} задаются как:

$$s_{k1} = \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[M+1, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+1]) \times (\mathbf{H}_k^-[M+1, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+1])^H, \quad (58)$$

$$s_{k2} = \sum_{i=1}^{2M+5} \mathbf{w}_c(i) (\mathbf{H}_k^-[M+2, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+2]) \times (\mathbf{H}_k^-[M+2, i] - \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+2])^H. \quad (59)$$

После производится вычисление матрицы коэффициентов Калмана:

$$\hat{\mathbf{K}}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{S}_k^{-1}, \quad (60)$$

обновление весовых коэффициентов:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \hat{\mathbf{h}}_k^- + \hat{\mathbf{K}}_k (\mathbf{d}_k - \hat{\mathbf{z}}_k^-), \quad (61)$$

где

$$\hat{\mathbf{z}}_k^- = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+1, 1] \\ \hat{\mathbf{h}}_k^-[M+2, 1] \end{bmatrix}, \quad (62)$$

и обновление ковариационной матрицы:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- + \hat{\mathbf{K}}_k \mathbf{S}_k \hat{\mathbf{K}}_k^H. \quad (63)$$

Затем цикл повторяется, а оптимальный ВВК элементов АФАР вычисляется как:

$$\mathbf{w}_k^{\text{опт}} = \hat{\mathbf{h}}_k[1:M]. \quad (64)$$

Модель канала в геостационарной спутниковой связи

В данной работе использовалась модель канала в геостационарной спутниковой связи (ГСС) согласно Рекомендации МСЭ-R P.681-11 [10], которая учитывает замирания в канале и доплеровский сдвиг спутника, генерируя тройные параметры Лу для каждого состояния полумарковской модели (рисунок 2).

Верхняя цепь генерирует быстрые изменения многолучевого сигнала, а нижняя – медленные изменения прямого сигнала. В верхней цепи две гауссовских серии в квадратуре с нулевым средним и единичным стандартным отклонением проходят через доплеровский фильтр для сигналов с единичной энергией. После доплеровского преобразования полученные комплексные серии умножаются на σ , где $2\sigma^2$ – среднеквадратическое значение изменений многолучевого сигнала.

Нижняя цепь выполняет имитацию изменений амплитуды и фазы прямого сигнала. На первом этапе генерируется стандартное гауссово распределение со средним M_A (дБ) и стандартным Σ_A (дБ) отклонением. На втором этапе серии, измеряемые в децибелах, преобразуются в линейные единицы измерений. Фильтр нижних частот имеет амплитудно-частотную характеристику, соответствующую спектральной плотности мощности доплеровского сдвига [10].

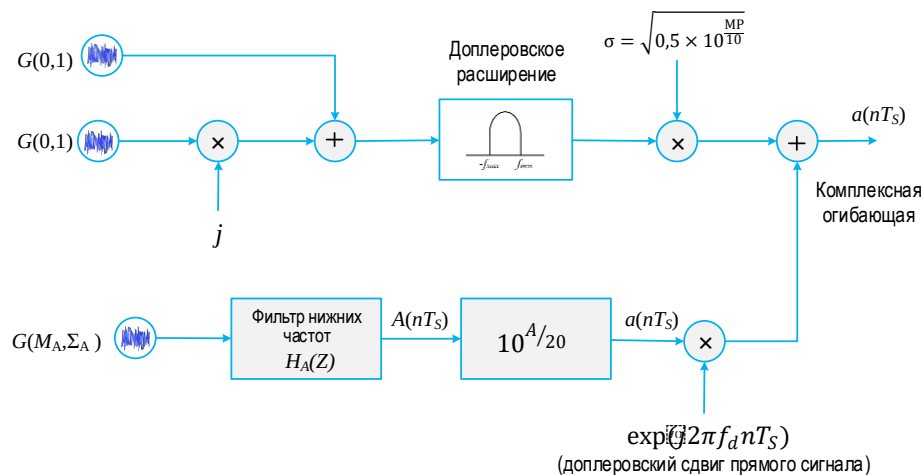


Рис. 2. Генератор временных серий Лу

Fig. 2. Generation of the Loo Time Series

На третьем этапе представлены изменения фазы прямого сигнала. Предполагается, что они изменяются линейно, что приводит к появлению постоянной спектральной доплеровской линии в зависимости от относительной скорости спутника подвижной связи, а также угла прихода, азимута и угла места относительно траектории мобильного устройства.

Результаты моделирования

Результаты моделирования исследуемых алгоритмов были проведены для АФАР, состоящей из 16×16 элементов. Отношение сигнал / шум (ОСШ) составляет 20 дБ, несущая частота – 2,2 ГГц, полоса сигнала – 36 МГц. В качестве модели канала были получены результаты для различных сред, таких

как городская застройка, пригород и сельская местность.

На рисунке 3 представлены результаты работы исследуемых алгоритмов. Алгоритмы ПОС рассматривались в двух ситуациях: в стационарном случае наземная станция была неподвижна относительно Земли; в нестационарном – происходило изменение угла азимута наземной станции (1 градус на 100 итераций алгоритма), что привело к изменению доплеровского сдвига.

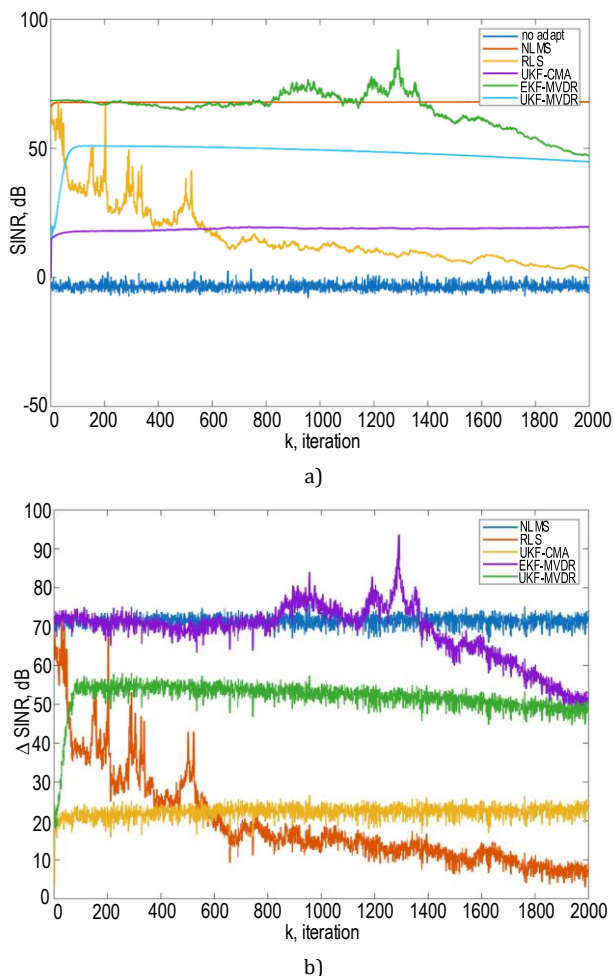


Рис. 3. ОСШ на входе и выходе АФАР при использовании алгоритмов ПОС для стационарной (а) и нестационарной (б) сигнально-помеховой обстановки

Fig. 3. SINR at the Input and Output of the Adaptive Antenna Array When Using Spatial Signal Processing Algorithms for Environments: a) Stationary; b) Nonstationary

На рисунке 4 представлены результаты выигрыша в ОСШ при использовании алгоритмов ПОС как для стационарного, так и нестационарного случаев. А в таблице 1 – значения выигрыша в ОСШ при использовании алгоритмов ПОС для различных сред. В таблице 2 показаны результаты сравнения исследуемых алгоритмов ПОС в условиях городской застройки, угол возвышения спутника составляет 30°.

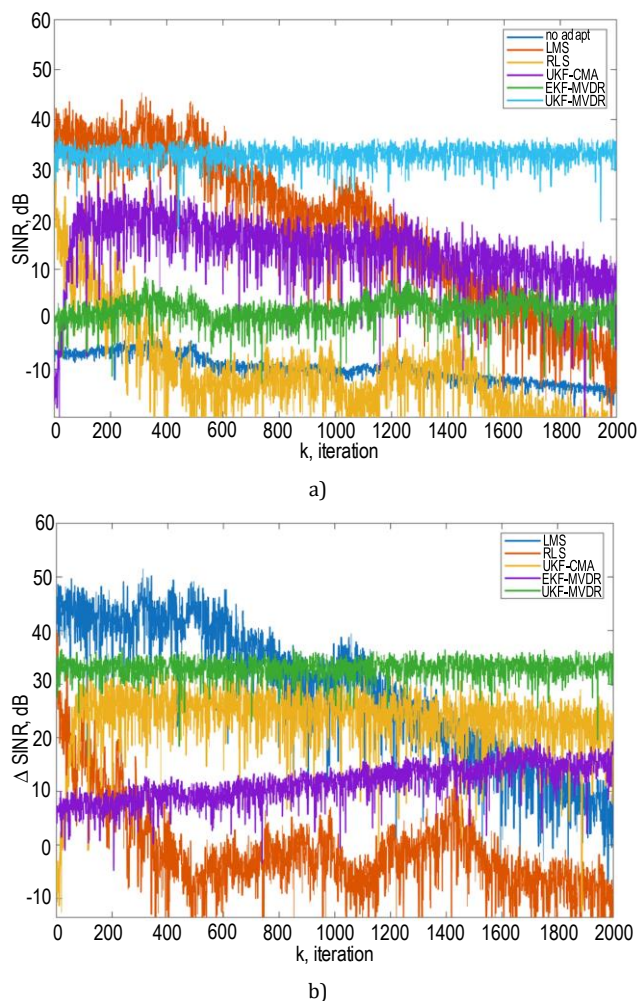


Рис. 4. Выигрыш в ОСШ при использовании алгоритмов ПОС для стационарной (а) и нестационарной (б) сигнально-помеховой обстановки

Fig. 4. SINR Gain of Spatial Signal Processing Algorithms for Environments: a) Stationary; b) Nonstationary

ТАБЛИЦА 1. Выигрыш в ОСШ при использовании алгоритмов ПОС для различных сред

TABLE 1. SINR Gain of Spatial Signal Processing Algorithms for Different Environments

Алгоритм	Город	Пригород	Сельская местность
LMS	69,29	73,62	74,25
RLS	28,8	29,3	31,55
UKF CMA	35	34,14	37,82
EKF MVDR	72,5	74,9	76,33
UKF MVDR	53,2	59,7	59,8

Исходя из полученных данных, представленных на рисунках 3–4, в стационарном случае устойчивым режимом обладают алгоритмы LMS и UKF-MVDR. При этом алгоритм LMS имеет меньшую вычислительную сложность, а также не требует дополнительных вычислений, связанных с определением угла прихода полезного сигнала. В нестационарном случае устойчивым режимом обладают алгоритмы UKF-MVDR и UKF-CMA.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение эффективности алгоритмов ПОС
TABLE 2. Comparison of Spatial Signal Processing Algorithms Efficiency

Алгоритм	Вычислительная сложность	Скорость сходимости, количество итераций	Выигрыш в ОСШ, дБ		Априорные данные	Устойчивость
			стационарный	нестационарный		
LMS	$3n$	60	69,3	21,4	Образцовый сигнал (пилот-сигнал)	Небольшие флуктуации амплитуды выходного сигнала (не более 3 %)
RLS	$3n^2 + 3n$	1200	28,8	8,3	Образцовый сигнал (пилот-сигнал)	Неустойчив к ситуации с замираниями канала и доплеровскому сдвигу. Возможно расхождение алгоритма
UKF CMA	$2n^4 + 15n^3$	40	35	32,7	Мощность полезного сигнала	Медленные изменения амплитуды выходного сигнала (более 5 %)
EKF MVDR	$10n^3 + 9n^2$	60	72,5	14,9	Угол прихода полезного сигнала	Изменения амплитуды выходного сигнала (более 10 %)
UKF MVDR	$2n^4 + 23n^3$	120	53,2	32,6	Угол прихода полезного сигнала	Медленные изменения амплитуды выходного сигнала (более 5 %)

Недостатком алгоритма EKF-MVDR является подверженность к изменению амплитуды выходного сигнала более чем на 5–10 %, что может привести к расхождению алгоритма. В свою очередь, алгоритм UKF-MVDR в меньшей степени подвержен изменению амплитуды выходного сигнала, однако он дает меньший выигрыш в ОСШ в результате адаптации. Ослабление амплитуды выходного сигнала в алгоритмах MVDR (см. рисунок 3) означает, что диаграмма направленности, полученная в результате работы алгоритма, имеет смещенный главный лепесток в направлении источника полезного сигнала.

Алгоритм EKF-CMA имеет устойчивый режим работы в условиях медленного изменения амплитуды входного сигнала, что характерно для канала связи ГСС, однако он дает незначительный выигрыш в ОСШ.

Список источников

1. Глушанков Е.И., Коровин К.О., Бойко И.А., Борисов М.Г. Современное состояние и перспективы развития адаптивных антенных комплексов в радиотехнических системах // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. С. 9. EDN:AKVWWB
2. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л., Распаев Ю.А., Хворов И.А. Адаптивные антенные решетки. Ч. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2016. С. 55.
3. Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Коровин К.О., Царик И.В., Бойко И.А., Казьмин О.Ю. Реализация алгоритма адаптивного диаграммообразования на ПЛИС // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 1(40). С. 19–20. DOI:10.26102/2310-6018/2023.40.1.025. EDN:JMTNCV
4. Щедрин А.А., Бойко И.А. Использование фильтра Калмана с ограничениями в целях уменьшения чувствительности приемной адаптивной фазированной антенной решетки к углу прихода // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 4. EDN:ENPYXH
5. Щедрин А.А., Бойко И.А., Глушанков Е.И. Исследование Калмановских алгоритмов фильтрации в целях адаптивного диаграммообразования // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 3–5. EDN:NHEOCZ

Заключение

В данной работе рассмотрены основные алгоритмы ПОС в ГСС как стационарные, основанные на винеровском решении, так и нестационарные, основанные на калмановской фильтрации.

Были получены результаты работы исследуемых алгоритмов для городской, пригородной и сельской сред. Наибольший выигрыш в ОСШ и устойчивый режим работы получается при использовании алгоритмов LMS и UKF-MVDR. Однако алгоритм LMS целесообразно использовать в стационарном случае, если наземная станция неподвижна относительно Земли. В нестационарном случае целесообразно использовать алгоритм UKF-MVDR, который, несмотря на свою вычислительную сложность, может обеспечить устойчивый режим работы.

6. Shubber Z.A., Jamel T.M., Nahar A.K. Beamforming Array Antenna Technique Based on Partial Update Adaptive Algorithms // International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. 2023. Vol. 14. Iss. 8. PP. 821–831. DOI:10.32985/ijeces.14.8.1
7. Fu X.-Z., Liu Z., Hu S.-L., Liu Z.-K. Variable step-size LMS adaptive algorithm and its application in time delay estimation for low SNR // Journal of Central South University (Science and Technology). 2012. Vol. 43. Iss. 3. PP. 1010–1019.
8. Bhotto M.Z.A., Bajić I.V. Constant Modulus Blind Adaptive Beamforming Based on Unscented Kalman Filtering // IEEE Signal Processing Letters. 2015. Vol. 22. Iss. 4. PP. 474–478. DOI:10.1109/LSP.2014.2362932
9. Omgond P., Singh H. Constrained Kalman filter based interference suppression in phased arrays // Proceedings of the International Microwave and RF Conference (IMaRC, Bangalore, India, 15–17 December 2014). IEEE, 2014. PP. 286–289. DOI:10.1109/IMaRC.2014.7039029
10. Рекомендация МСЭ-R P.681-11. Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования систем сухопутной подвижной спутниковой службы. 2019.

References

1. Glushankov E., Korovin K., Boyko I., Borisov M. The Current State and Prospects for the Development of Adaptive Antenna Complexes in Radio Engineering Systems. *Herald of SPbSUT*. 2024;2(1):9. (in Russ.) EDN:AKVWWB
2. Grigoriev V.A., Shchesnyak S.S., Gulyushin V.L., Raspaev Yu.A., Khvorov I.A., Shchesnyak A.S. Adaptive Antenna Arrays. Part 1. St. Petersburg: ITMO-University Publ.; 2016. p. 55. (in Russ.)
3. Glushankov E.I., Kirik D.I., Korovin K.O., Tsarik I.V., Boyko I.A., Kazmin O.Yu. Implementation of the adaptive beamforming algorithm on FPGA. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1):19–20. (in Russ.) DOI:10.26102/2310-6018/2023.40.1.025. EDN:JMTNCV
4. Shchedrin A., Boyko I. Using a Kalman Filter With Constraints to Reduce the Sensitivity of the Receiving Active Phased Array Antenna to the Angle. *Herald of SPbSUT*. 2024;2(4):4. (in Russ.) EDN:ENPYXH
5. Shchedrin A.A., Glushankov E.I., Boyko I.A. Researching Kalman filtering algorithms for adaptive generation of radiation pattern. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of Radio Electronics named after A.S. Popov, Dedicated to the Radio Day*. 2024;1(79):3–5. (in Russ.) EDN:NHEOCZ
6. Shubber Z.A., Jamel T.M., Nahar A.K. Beamforming Array Antenna Technique Based on Partial Update Adaptive Algorithms. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*. 2023;14(8):821–831. DOI:10.32985/ijeces.14.8.1
7. Fu X.-Z., Liu Z., Hu S.-L., Liu Z.-K. Variable step-size LMS adaptive algorithm and its application in time delay estimation for low SNR. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2012;43(3):1010–1019.
8. Bhotto M.Z.A., Bajić I.V. Constant Modulus Blind Adaptive Beamforming Based on Unscented Kalman Filtering. *IEEE Signal Processing Letters*. 2015;22(4):474–478. DOI:10.1109/LSP.2014.2362932
9. Omgond P., Singh H. Constrained Kalman filter based interference suppression in phased arrays. *Proceedings of the International Microwave and RF Conference, IMaRC, 15–17 December 2014, Bangalore, India*. IEEE; 2014. p.286–289. DOI:10.1109/IMaRC.2014.7039029
10. Rec. ITU-R P.681-11. Propagation data required for the design systems in the land mobile-satellite service. 2019.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 28.10.2025.

The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 28.10.2025.

Информация об авторах:

БОЙКО
Игорь Андреевич

ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-8856-9733>

ГЛУШАНКОВ
Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

ЛЯЛИНА
Анна Жановна

ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0003-7460-0949>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.396.9+004.94

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96>

EDN:HFEDWC



Имитационная модель для исследования алгоритмов планирования радиоресурсов уровня доступа в сетях мобильной связи

Кирилл Игоревич Брагин¹✉, bragik.irl@yandex.com

Иван Алексеевич Норицин², defenderivan2015@gmail.com

Вера Геннадьевна Дроздова¹, drozdova@sibguti.ru

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, 630102, Российская Федерация

²ООО «Ядро Центр Технологий Мобильной Связи», Санкт-Петербург, 195160, Российская Федерация

Аннотация

Эффективное планирование радиоресурсов на уровне доступа к среде является критически важной задачей для обеспечения качества обслуживания в мобильных сетях. Перспективным направлением становится использование машинного обучения и искусственного интеллекта для решения задачи планирования на MAC-уровне. Существующие универсальные симуляторы (MATLAB, ns-3, OMNeT++) мало оптимизированы для глубокого исследования алгоритмов планирования ресурсов и имеют ограничения при их интеграции.

Целью настоящей статьи является разработка специализированной имитационной модели планирования ресурсов сети LTE (Long Term Evolution) на уровне доступа для исследования классических и интеллектуальных алгоритмов планирования.

Сущность предлагаемого решения заключается в создании модульной имитационной модели, включающей различные модели мобильности пользователей, распространения радиосигналов, генерации трафика и классические алгоритмы планирования (Round Robin, Proportional Fair, Best CQI). Модель специализируется на детальной разработке процессов MAC-уровня. Система реализована на языке Python с модульной архитектурой, обеспечивающей интеграцию алгоритмов на базе машинного обучения и искусственного интеллекта. Исходный код размещен в открытом репозитории GitHub.

Эксперименты проводились для имитационного сценария бесконечного буфера, тремя пользователями различных классов мобильности в городской среде. Испытывались три классических алгоритма планирования с оценкой пропускной способности, индекса справедливости Джейна и спектральной эффективности.

Научная новизна решения состоит в создании специализированной имитационной модели, оптимизированной для исследования алгоритмов планирования MAC-уровня с возможностью интеграции методов машинного обучения и обеспечивающей гибкость настройки различных сценариев моделирования.

Теоретическая значимость заключается в расширении инструментария для исследования алгоритмов планирования ресурсов мобильных сетей и создании основы для разработки интеллектуальных планировщиков.

Практическая значимость состоит в предоставлении исследователям специализированного инструмента для разработки, тестирования и сравнения алгоритмов планирования, а также в возможности адаптации модели для сетей 5G / 6G и интеграции планировщиков с учетом качества обслуживания.

Ключевые слова: LTE, планирование ресурсов, MAC-уровень, имитационное моделирование, планировщик

Ссылка для цитирования: Брагин К.И., Норицин И.А., Дроздова В.Г. Имитационная модель для исследования алгоритмов планирования радиоресурсов уровня доступа в сетях мобильной связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 84–96. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96. EDN:HFEDWC

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96>

EDN:HFEDWC

Simulation Model for Radio Resource Scheduling Algorithms at MAC Layer of Mobile Networks

 Kirill I. Bragin¹✉, bragik.irl@yandex.com

 Ivan A. Noritsin², defenderivan2015@gmail.com

 Vera G. Drozdova¹, drozdova@sibguti.ru

¹Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

²YADRO Center of Mobile Communication Technologies, LLC,
St. Petersburg, 195160, Russian Federation

Annotation

Effective radio resource scheduling at the Medium Access Control (MAC) layer is a critically important task for ensuring quality of service in mobile networks. The use of machine learning and artificial intelligence for MAC-layer scheduling is becoming a promising direction. Existing general-purpose simulators (MATLAB, ns-3, OMNeT++) are insufficiently optimized for in-depth research of resource scheduling algorithms and have limitations in their integration.

The purpose of this article is to develop a specialized simulation model for LTE (Long Term Evolution) network resource scheduling at the MAC layer for investigating both classical and intelligent scheduling algorithms.

The core of the proposed solution lies in creating a modular simulation model that incorporates different user mobility models, radio propagation models, traffic generation models, and classical scheduling algorithms (Round Robin, Proportional Fair, Best CQI). The model specializes in detailed simulation of MAC-layer processes. The system is implemented in Python with modular architecture enabling integration of machine learning and artificial intelligence-based algorithms. The source code is hosted in an open GitHub repository.

Experiments were conducted for an infinite buffer simulation scenario with three users from different mobility classes in an urban environment. Three classical scheduling algorithms were tested with evaluation of throughput, Jain's fairness index, and spectral efficiency.

The scientific novelty of the solution lies in creating a specialized simulation model optimized for investigating MAC-layer scheduling algorithms with the capability to integrate machine learning methods and providing flexibility in configuring various simulation scenarios.

The theoretical significance consists in expanding the toolkit for studying mobile network resource scheduling algorithms and establishing a foundation for developing intelligent schedulers.

The practical significance is providing researchers with a specialized tool for developing, testing, and comparing scheduling algorithms, as well as the ability to adapt the model for 5G/6G networks and integrate quality-of-service-aware schedulers.

Keywords: LTE, resource scheduling, MAC layer, simulation modeling, scheduler

For citation: Bragin K.I., Noritsin I.A., Drozdova V.G. Simulation Model for Radio Resource Scheduling Algorithms at MAC Layer of Mobile Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):84–96. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96. EDN:HBVZAJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Пропускная способность мобильных сетей связи зависит от множества факторов, включающих состояние канала передачи данных, применение передовых методов модуляции и технологий эффективного использования частотного спектра. Максимально достижимая теоретическая пропускная

способность канала описывается пределом Шеннона и в настоящий момент существует ряд препятствий, не позволяющих системам мобильной связи приблизиться к нему [1]. Первое направление – борьба с шумом и интерференцией в канале, для этого разрабатываются новые виды модуляции, а также помехоустойчивые методы кодирования.

Второе направление – развитие многоантенных систем, что может увеличить емкость за счет пространственных потоков передачи данных и уменьшить взаимные помехи с внедрением технологий направления луча (beamforming), однако идеальное разделение пространственных потоков является сложной задачей из-за ограничения физического размера устройств и взаимного влияния антенн. Третье направление – динамическая адаптация к изменениям среды передачи, на которую влияют передвижение абонентов и погодные условия (что весьма актуально для миллиметровых волн). Особую роль играет также планирование ресурсов на уровне доступа к среде, продвинутое алгоритмы предоставляют компромиссное решение вопросов справедливости распределения ресурсов между пользователями, снижения задержек для чувствительных к времени сервисов, энергоэффективности и др., что также влияет на общую пропускную способность канала, достигаемую в единицу времени.

Совершенствование механизмов планирования ресурсов в мобильной сети связи актуально и оправдано, так как это решает фундаментальную задачу повышения эффективности, качества и адаптивности беспроводных сетей. Эффективные алгоритмы планирования позволяют адаптивно распределять ресурсы между пользователями, в зависимости от состояния канала, нагрузки и приоритетов трафика (учет QoS), тем самым увеличивая суммарную производительность и спектральную эффективность [2]. С развитием сетей пятого и шестого поколений (5G и 6G) возникают новые сценарии использования ресурсов, где требуются специализированные подходы к планированию. Современные исследования охватывают интеграцию методов глубокого и машинного обучения (ML, *аббр. от англ. Machine Learning*) в задаче планирования, что позволяет реализовать более гибкие и адаптивные схемы управления ресурсами [3].

Разработка эффективных методов планирования позволит решить вопросы оптимизации алгоритмов для разнородного трафика, динамически изменяющихся нагрузки сети и состояния канала. Для безопасного тестирования и охвата различных сценариев работы сети, в том числе экстремальных, используются имитационные модели. Они позволяют исследовать поведение планировщиков в различных состояниях системы, гибко изменять и настраивать их параметры, проверять различные гипотезы и испытывать новые методы, ускоряя разработку алгоритмов планирования нового поколения.

Для имитационного моделирования сетей мобильной связи на текущий момент могут использоваться такие инструменты, как MATLAB, ns-3, OMNet++, которые представляют универсальные

платформы общего назначения, ориентированные на моделирование широкого спектра сетевых протоколов и технологий. Однако универсальные симуляторы, при всех их достоинствах, не оптимизированы для глубокого исследования специфики алгоритмов планирования ресурсов. Их архитектура создает вычислительные накладные расходы и ограничивает возможности реализации гибридных подходов, включающих использование интеллектуальных алгоритмов на базе ML [4]. Также важно уделить внимание оптимизации производительности как самих алгоритмов, так и имитационной модели, которая может быть перегружена вычислениями на уровнях помимо MAC и PHY (*MAC, аббр. от англ. Medium Access Control; PHY, аббр. от англ. Physical Layer*) [5]. Поддержка уникальных сценариев и бенчмарков работы планировщиков, включая интеграцию с ML-алгоритмами и алгоритмами на базе искусственного интеллекта (AI, *аббр. от англ. Artificial Intelligence*), позволит выявить новые закономерности в поведении интеллектуальных систем планирования и обеспечить их дальнейшую адаптацию к сетям мобильной связи, включая новые поколения (5G / 6G).

В рамках данной статьи представлена имитационная модель планирования ресурсов сети LTE на уровне доступа к среде, интегрирующая классические алгоритмы, такие как Round Robin (RR), Proportional Fair (PF) и Best CQI (*аббр. от англ. Channel Quality Indicator*), готовая к исследованию подходов на основе ML. Классические алгоритмы используются для валидации корректности модели и формирования базы для последующего сравнения с DRL-планировщиками (*аббр. от англ. Deep Reinforcement Learning*). Для обеспечения необходимого уровня правдоподобности результаты исследования работы алгоритмов планирования ресурсов были сопоставлены с последними исследованиями в этом направлении.

Ключевой особенностью разработанной модели является ее архитектура, специально спроектированная для многофункционального, масштабного исследования и разработки алгоритмов планирования ресурсов, в особенности интеллектуальных, основанных на методах ML и AI. Современные исследования демонстрируют значительный потенциал применения DRL-планировщиков. Модель предоставляет гибкую среду для дальнейшей интеграции таких методов, что критически важно для развития сетей следующих поколений. В отличие от существующих симуляторов общего назначения, которые ориентированы на широкий спектр сетевых протоколов, предложенная имитационная модель специализируется на детальном моделировании процессов планирования ресурсов на уровне MAC. Это позволит исследователям сосредоточиться на разработке и тестировании сложных алгоритмов

без накладных расходов на моделирование других уровней. Модульная архитектура обеспечивает возможность быстрого прототипирования ML / AI-алгоритмов, их сравнения с классическими решениями и тестировании в различных сценариях.

Классические алгоритмы планирования, представленные Round Robin, Proportional Fair, Best CQI, выполняют роль эталонных решений для валидации корректности работы имитационной среды и служат базой для сравнения с перспективными разработками. Их использование обусловлено необходимостью подтверждения адекватности модели и соответствия результатов теоретическим ожиданиям и данным других симуляторов, что является ключевым этапом перед внедрением более сложных решений и обеспечивает гибкость по сравнению с универсальными симуляторами.

2. АРХИТЕКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

2.1. Общая информация по планированию ресурсов на уровне MAC

Уровень доступа к среде (MAC-уровень) в сетях мобильной связи играет ключевую роль, обеспечивая эффективное распределение радиоресурсов между пользователями. Структура, основной функционал и действующие процедуры уровня MAC описаны в технической спецификации 3GPP TS 36.321 [6]. Функции уровня включают распределение ресурсных блоков (RB, *аббр. от англ.* Resource Block) частотно-временной сетки по технологии OFDMA (*аббр. от англ.* Orthogonal Frequency Division Multiple Access) в направлении Downlink Scheduling (DL) и технологии SC-FDMA (*аббр. от англ.* Single Carrier Frequency Division Multiple Access) в направлении Uplink Scheduling (UL), учет таких параметров как CQI, состояние буфера, а также механизм повторной передачи пакетов Hybrid ARQ (HARQ). В планировании ресурсов важную роль играет и уровень PHY, который регламентируется TS 36.213 [7], определяющий механизмы формирования ресурсной сетки, ее структуру и параметры. На PHY происходит измерение качества канала, получение отношения сигнал / шум+интерференция (SINR, *аббр. от англ.* Signal to Interference + Noise Ratio), что влияет на выбор схемы модуляции и кодирования, напрямую определяющих пропускную способность. Сигнализация на этом уровне позволяет пользовательским терминалам знать информацию о запланированных ресурсах, а адаптивная модуляция обеспечивает подстройку канала под изменяющиеся условия среды. Именно уровни PHY и MAC формируют основу для динамического планирования ресурсов и влияют на качество обслуживания абонентов.

Для приближения модели к реальным условиям работы сети требуется реализовать логику изменения состояния канала. Например, имитация мобиль-

ности абонентов осуществляется с помощью математических моделей передвижения, а имитировать изменение параметров канала позволяют модели распространения радиосигналов. Если речь идет о распределении ресурсов, то необходимо понимать, какой объем этих ресурсов будет необходим пользователю, поэтому буфер пользователя будет заполняться за счет моделей генерации трафика. Кроме того, исследователями часто используются принципиальные модели обработки трафика и буфера – Full Buffer и Bursty Traffic [8]. Они применяются в различных сценариях планирования ресурсов. Например, Full Buffer подразумевает, что буфер пользователя никогда не пустеет, и он запрашивает максимальное возможное количество ресурсов, которое может предоставить сеть. Bursty Traffic использует модели генерации трафика для имитации неравномерного поступления пакетов в буфер, чередуя периоды активности и простоя, что используется для более реалистичного моделирования пользовательского поведения.

2.2. Схема имитационной модели.

Модули базовой станции и пользователя

Опираясь на технические спецификации 3GPP и существующие исследования планировщиков в других средах моделирования [2–7], определена архитектура имитационной модели, удовлетворяющая вышеперечисленные требования (рисунок 1).

Рассмотрим подробно элементы структурной схемы имитационной модели. В сетях мобильной связи планирование осуществляется в двух направлениях: DL, канал передачи от базовой станции к пользователю, и UL, от пользователя к базовой станции. Таким образом, планировщики должны работать в обоих направлениях.

Основу модели составляет модуль базовой станции (BS module, *от англ.* Base Station Module), функционирующий с модулем планировщика (Scheduler) и ресурсной сетки (Resource Grid), а также модуль пользовательских устройств (UE module, *от англ.* User Equipment Module). Для хранения данных в модулях реализованы буферы, за счет чего модули структурно похожи друг на друга, но отличаются функционалом и атрибутами. Например, буфер базовой станции рассчитан на работу с несколькими пользователями, точнее очередями, и обладает большой емкостью, в то время как буфер обычного пользователя ограничен в объеме, поэтому, чтобы не допустить его переполнения при планировании ресурсов, используется специальный отчет Buffer Status Report, данными из которого пользуются планировщики.

UE module позволяет создавать и гибко настраивать требуемое количество экземпляров, которые будут задействованы в симуляции. Внутри модуля осуществляется сбор информации о состоянии

канала, буфера и другой служебной информации, которую затем получает планировщик. Для каждого устройства в симуляции можно назначить модели канала (Channel Model), мобильности (Mobility Model) и генерации трафика (Traffic Model). Из особенностей работы с модулем, которые не встречаются в других симуляторах, можно отметить возможность настройки условного класса пользователя по типу «пешеход», «автомобиль», «велосипедист», «внутри зданий». Планируется дальнейшее

расширение, чтобы представить стационарные устройства по типу IoT. Экземпляры можно настраивать каждый в отдельности или создавать коллекции, состоящие из множества экземпляров, объединенных общими признаками. Таким образом, модели в симуляции могут настраиваться не только глобально, но и учитывать частные случаи, что повышает достоверность симуляции и приближенность к реальным условиям.

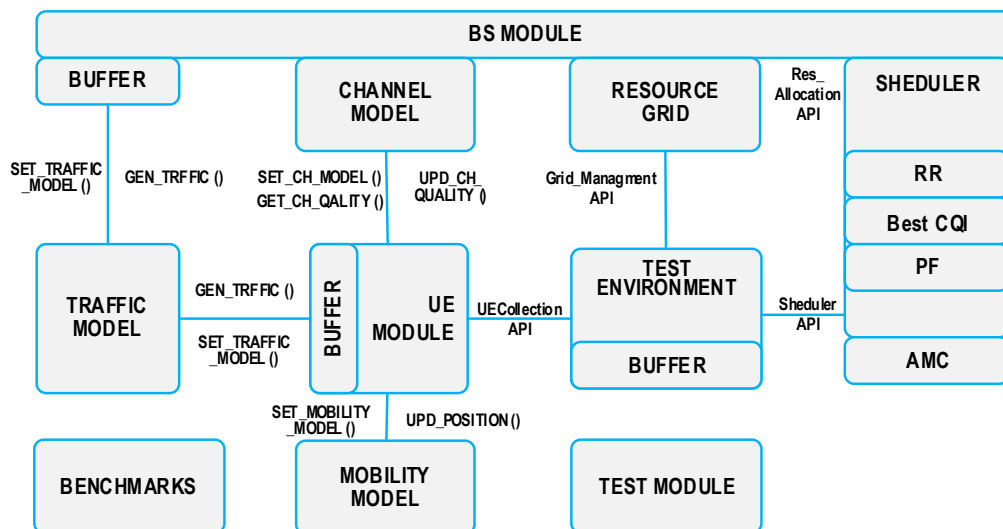


Рис. 1. Блочная структурная схема имитационной модели

Fig. 1. Simulation Model Block Architecture

2.3. Модели мобильности

В целях обеспечения динамического изменения состояния канала во времени необходимо симулировать передвижение абонентов относительно базовой станции. Для этой задачи применяются математические модели передвижения пользователей, которые представлены в Mobility Model. В перечень реализованных моделей вошли: Random Walk, Random Waypoint, Random Direction, Gauss-Markov Model. Их можно разделить на те, которые используются в закрытой местности, например, в зданиях, и – в открытой.

Random Walk определяет случайное направление и скорость движения (изменения координат). Каждое новое положение пользовательского устройства рассчитывается за постоянный интервал времени или за постоянное пройденное расстояние, в конце которого вычисляется новое направление и скорость. При достижении границ симулируемого пространства происходит «отскок» и изменение направления. Эта модель передвижения без памяти (не хранит историю предыдущих местоположений), что может порождать нереалистичные движения.

Random Waypoint включает в себя понятие паузы между изменениями направления движения

и / или скорости. Перед тем, как начать движение, пользователь остается на месте в течении определенного времени, а по его истечении выбирает случайный пункт назначения и движется к нему с заданной скоростью. По прибытии пользователь снова выдерживает паузу, прежде чем начать движение.

Random Direction аналогична модели Random Walk, однако отличается поведение при достижении границы симуляции, после которого выдерживается пауза и выбирается новое случайное направление.

Gauss-Markov – модель Гаусса – Маркова для передвижения абонента так, чтобы адаптироваться к различным уровням случайности с помощью определенного параметра настройки. Изначально каждому устройству присваивается текущая скорость и направление движения. Через фиксированные промежутки времени происходит обновление скорости и направления движения. В частности, значение скорости и направления для n -го момента времени рассчитывается на основе значения скорости и направления в $(n - 1)$ -й момент времени. Подробный анализ этих моделей представлен в исследовании [9, 10].

Реализация модели Гаусса – Маркова математически описывается выражениями (1, 2).

$$\begin{aligned} u_n &= \alpha \cdot u_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \bar{u} + \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot u_x, \\ \theta_n &= \alpha \cdot \theta_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \bar{\theta} + \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \theta_x, \\ \alpha &\in [0,1], \end{aligned} \quad (1)$$

где u_n – скорость устройства для момента времени n ; θ_n – направление движения устройства в момент времени n ; α – параметр настройки для изменения случайности; $\bar{u}$ – среднее значение скорости; $\bar{\theta}$ – среднее значение направления; u_x, θ_x – случайные значения из Гауссовского распределения.

В каждом временном интервале следующее значение координат рассчитывается на основе текущего местоположения, скорости и направления, например, для момента n координаты рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + u_n \cdot \cos\theta_n, \\ y_n &= y_{n-1} + u_n \cdot \sin\theta_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_n, x_{n-1} – координаты X устройства в момент времени n и $n - 1$, соответственно; y_n, y_{n-1} – координаты Y устройства в момент времени n и $n - 1$, соответственно; u_n – скорость устройства для момента времени n ; θ_n – направление движения устройства в момент времени n .

Чтобы гарантировать, что устройство не останется вблизи края области симуляции в течение длительного времени, они оттесняются, когда находятся на определенном расстоянии от краев. Визуализацию передвижения пользователя, согласно данной модели, можно рассмотреть на рисунке 2.

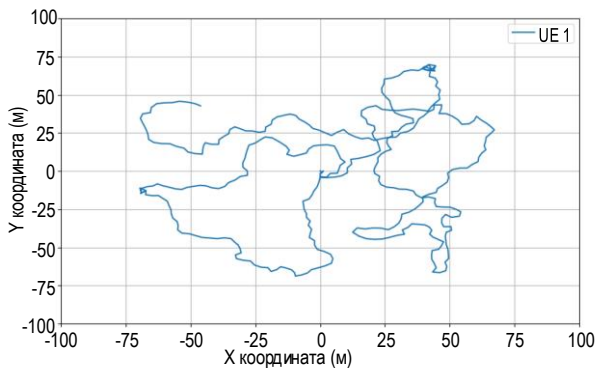


Рис. 2. Передвижение абонента в среде симуляции согласно модели Гаусса – Маркова

Fig. 2. User Mobility in Simulation Environment According to the Gauss – Markov Model

$$\begin{aligned} PL_{UMa-LOS} &= \begin{cases} PL_1 = 28 + 22 \cdot \log_{10}(d_{3D}) + 20 \cdot \log_{10}(f_c) \\ PL_2 = 28 + 40 \cdot \log_{10}(d_{3D}) + 20 \cdot \log_{10}(f_c) - 9 \cdot \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \end{cases} \\ PL_1 &\in [10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP}], \\ PL_2 &\in [d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 km]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} PL_{UMa-NLOS} &= \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS}), \\ PL'_{UMa-NLOS} &= 13,54 + 39,08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0,6(h_{UT} - 1,5). \end{aligned} \quad (4)$$

2.4. Модели распространения радиосигналов

Модели распространения сигнала являются важнейшей частью симуляции мобильных сетей связи. С их помощью определяется уровень потерь на трассе между пользовательским устройством и базовой станцией, что в дальнейшем используется при вычислении SINR и метрики качества канала CQI. Модели распространения радиосигналов подробно описаны в спецификации 3GPP TR 38.901 [11].

Определяют следующие типы моделей:

- RMa (аббр. от англ. Rural Macro) – сельская макросотовая зона;
- UMa (аббр. от англ. Urban Macro) – городская макросотовая зона;
- UMi (аббр. от англ. Urban Micro) – городская микросотовая зона.

Каждая из перечисленных моделей определяется математическим описанием для расчета затухания радиосигнала (PL, аббр. от англ. Path Loss) и вероятности прямой видимости базовой станции (LOS, аббр. от англ. Line of Sight). Важно отметить, что данные модели учитывают нахождение абонента на открытом воздухе либо в помещении или в машине. Приведенные модели являются статистическими, они созданы на основе экспериментальных данных, полученных в различных условиях. Для примера рассмотрим расчет PL модели UMa.

Сценарий прямой видимости описывается выражением (3), где PL_1 – потери на расстояниях до точки разрыва (breakpoint distance), дБ; PL_2 – потери пути на расстояниях после точки разрыва, дБ; d_{3D}, d_{2D} – расстояние от антенны пользователя и от базовой станции, соответственно, до базовой станции, км; f_c – центральная частота, Гц; h_{BS} – высота антенны базовой станции, м; h_{UT} – высота антенны пользователя, м; d_{BP} – расстояние точки излома, на котором изменяется характер распространения сигнала:

$$d_{BP} = \frac{2\pi h_{BS} h_{UT} f_c}{c},$$

где c – скорость света, м/с.

Для случая отсутствия прямой видимости (NLOS, аббр. от англ. Non Line of Sight) характерно выражение (4).

Далее, в модели UMa (а также RMa, UMi), критически важным является расчет вероятности LOS базовой станции. Это играет важную роль в реалистичном моделировании, так как LOS- и NLOS-сценарии имеют принципиально разное затухание. Эти параметры рассчитываются по выражению (5).

$$Pr_{LOS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D-out} \leq 18 \text{ m} \\ \left[\frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D-out}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{150}\right) \right) & , 18 \text{ m} < d_{2D-out} \end{cases} \quad (5)$$

$$C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \leq 13 \text{ m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} & , 13 \text{ m} < h_{UT} \leq 23 \text{ m} \end{cases}$$

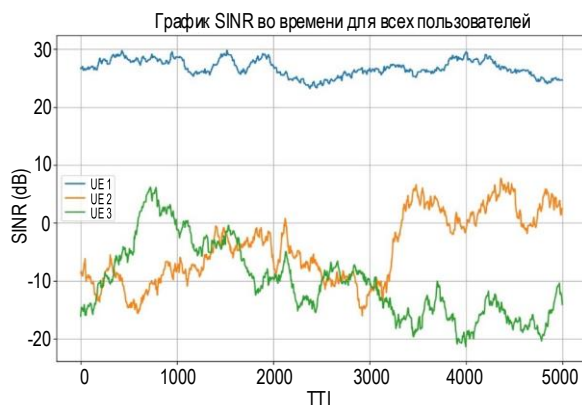


Рис. 3. График изменения SINR во время симуляции для трех абонентов. Модель UMi

Fig. 3. SINR Variation During Simulation for Three Subscribers. UMi Model

2.5. Генерация трафика

Как было упомянуто ранее, существует два основных сценария для исследования работы планировщиков – Full Buffer и Bursty Traffic. В первом случае данные заполняют весь буфер пользовательского устройства, и планировщик оперирует условно бесконечными данными. Абоненты не исчезают из симуляции и постоянно находятся в ней. Это удобно в случае, когда необходимо проверить общее функционирование алгоритма планирования или нагрузить его. Для более реалистичного моделирования может использоваться сценарий Bursty Traffic, в котором трафик генерируется периодически, что удобно при симуляции устройств IoT, разнородного трафика по типу телефонии или потоковых сервисов. Для этого в модуле Traffic Model предусмотрены такие математические модели трафика как распределение Пуассона, ON / OFF, а также стохастическая модель MMPP (аббр. от англ. Markov-Modulated Poisson Process), объединяющая марковские процесс с пуассоновской генерацией [12, 13]. В данной статье для демонстрации работы имитационной модели будет использован сценарий Full Buffer, в связи с чем описание существующих моделей трафика решено опустить.

Затем при использовании UMi (и других моделей канала) в комбинации с любой моделью мобильности можно получить изменения затухания в канале за время симуляции (PL), что позволяет построить графики SINR для каждого пользователя (рисунок 3).

2.6. Модуль планировщика

В имитационной модели планировщик тесно связан с модулем базовой станции, ресурсной сетки и адаптивно-кодовой модуляции (АМК, аббр. от англ. Adaptive Coding Modulation). Именно здесь реализованы такие алгоритмы планирования, как RR, PF и Best CQI. В дальнейшем планируется пополнить список алгоритмов, например, ориентированных на работу с QoS-трафиком, и решения, основанные на ML.

На момент написания статьи, планировщик способен работать в режиме планирования DL или UL канала. В качестве эксперимента выбран первый. Основная задача планировщика – выделение ресурсов пользователю, по мере требования. В качестве ресурса выступают ресурсные блоки частотно-временной сетки. Алгоритм осуществляет распределение RB за один временной интервал (TTI, аббр. от англ. Transmission Time Interval), длящийся 1 мс и состоящий из двух слотов, по одному RB на поднесущую в слоте.

Для эффективности и быстродействия применяется понятие ресурсной группы (RBG, аббр. от англ. Resource Block Group), размеры которой зависят от ширины полосы, например, для полосы шириной 10 МГц используется размер группы, равный 3 RB, причем группа выделяется параллельно в обоих слотах. Данный механизм регулируется 3GPP TS 36.213 и называется Resource Allocation Type 0 [6]. Тип распределения ресурсов позволяет обеспечить необходимую гибкость работы с ресурсами и уменьшить количество служебной информации, представляемой в виде битовой карты (bitmap) распределения, которая необходима для того, чтобы пользовательские устройства понимали, на каких поднесущих необходимо ожидать предназначенные им RBG.

В процедуру планирования DL на примере алгоритма RR входят такие этапы как:

- получение информации о состоянии сети, количестве активных пользователей и наличии данных для передачи, доступных ресурсах на текущий TTI;

- формирование очереди пользователей в соответствии с внутренним порядком (для RR);
- выделение RBG происходит через циклическую очередь;
- выделение необходимого количества доступных RBG, перераспределение оставшихся блоков (если таковые имеются) текущим активным пользователям;
- формирование и отправка служебной информации и команд, для чего используется DCI (*аббр. от англ. Downlink Control Information*), в которой указывается количество выделенных RB, параметры модуляции и кодирования;
- обновление состояния, переход к следующему циклу, обновление данных о буфере, обслуженных пользователях, статистика.

Совместно с планировщиком работает механизм AMC, отвечающий за динамическую адаптацию па

раметров передачи под текущие условия канала. При ухудшении SINR происходит понижение схемы модуляции для уменьшения вероятности возникновения ошибок и, как следствие, уменьшения количества повторных передач и вызова процесса HARQ. Планировщик использует данные от AMC для определения емкости RB. Это напрямую влияет на пропускную способность как каждого пользователя, так и соты в целом (чем больше модуляция, тем большее количество бит передается в TTI), на минимизацию задержек и выбросов (dropout), и даже на индекс справедливости выделения ресурсов, так как может снижать дисбаланс между пользователями на краю соты и вблизи базовой станции. Пример визуализации ресурсной сетки в ходе симуляции работы планировщика на основе RR можно увидеть на рисунке 4.

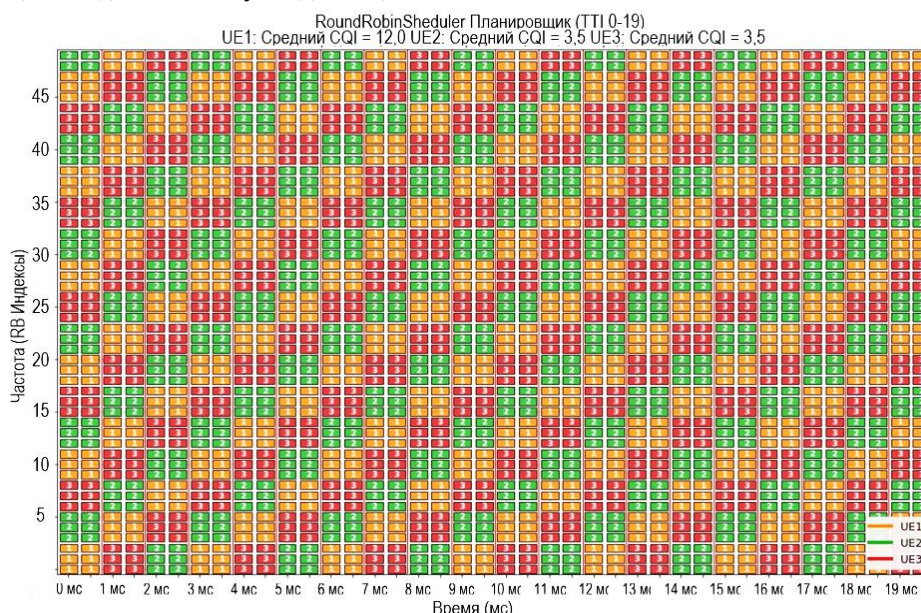


Рис. 4. Визуализация распределения ресурсных блоков для полосы 10 МГц. Планировщик Round Robin

Fig. 4. Resource Block Allocation for 10 MHz Band. Round Robin Scheduler

2.7. Вспомогательные модули

Помимо основных модулей, в программном решении представлены вспомогательные компоненты. Один из них – *среда тестирования* (Test Environment), предназначенный для создания различных экспериментов, связывания всех модулей в единой точке входа и получение детальной информации об их работе, а также отрисовка графиков с помощью «Visualizer». Все графики, представленные ранее, были получены с помощью данного модуля. Среда тестирования позволяет гибко настраивать параметры эксперимента, оперирует пользовательскими устройствами, параметрами базовой станции и ресурсной сетки.

Модуль тестов (Test Module) – технический модуль, используемый для отладки и тестирования

остальных компонентов, проверки их работоспособности и краевых условий функционирования. А также для валидации результатов, получаемых в ходе работы имитационной модели, сравнение с техническими нормами и допусками 3GPP и другими симуляторами.

В разработке находится *модуль бенчмарков* (Benchmarks), который будет использоваться для быстрого доступа к разнообразным сценариям работы имитационной модели посредством скриптов. Например, нагрузочное тестирование планировщика большим количеством пользователей, генерация разнородного трафика (в том числе, чувствительного к задержкам), большое количество мобильных абонентов на автомобилях, стационарные сценарии с симуляцией передвижения в рамках зданий [14, 15].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ

3.1. Параметры симуляции

В рамках данной статьи производится экспериментальная проверка планирования ресурсов на нисходящей линии (DL) для сети LTE. Для симуляции используется детальное моделирование перемещений абонентов, а также затуханий в канале связи. Всего выбрано три классических планировщика: RR, PF и Best CQI. Применяется Full buffer сценарий нагрузки планировщиков. HARQ отключен, однако используется динамическая адаптация модуляции и кодовых схем согласно отчетам о CQI и состоянию канала (посредством вычисления SINR).

Симуляция выполнялась на персональном компьютере с процессором Intel Xeon E5-2470, в наличии 16 Гбайт оперативной памяти, под управлением операционной системы Windows 10. В среднем на обработку одного TTI моделям требуется около 1 мс; время отличается в зависимости от используемого алгоритма планирования и количества пользователей (рост линейный). Данный показатель может быть улучшен, так как в текущей версии модели нет логики параллельных вычислений и обработки с помощью графического процессора (планируется в дальнейшем), что будет полезно при выполнении симуляции с большим числом пользователей (1000+). Всего в текущей симуляции задействована одна базовая станция и три пользователя разного класса: «автомобиль», «пешеход», находящихся на разном расстоянии от базовой станции. Ресурсная сетка настроена на ширину полосы 10 МГц. Чтобы сравнить поведение исследуемых планировщиков, используются известные метрики, такие как индекс справедливости Джейна (Jain's Fairness Index), достигаемая пропускная способность, спектральная эффективность. Полный список параметров можно изучить в таблице 1.

Важно отметить, что представленный эксперимент служит демонстрацией функциональности разработанной модели и проверкой корректности ее базовых компонентов. Цель данного тестирования – демонстрация работоспособности архитектуры модели, а не получение окончательных результатов для глубокого анализа алгоритмов планирования. Параметры симуляции могут быть гибко изменены исследователем в зависимости от поставленных задач; количество пользователей, длительность симуляции, модели мобильности и канала настраиваются в широких пределах.

ТАБЛИЦА 1. Параметры симуляции

TABLE 1. Simulation Parametres

Параметр	Значение, единица измерения
Длительность симуляции	5000 мс
Ширина полосы	10 МГц
Длительность подкадра (TTI)	1 мс
Количество поднесущих на RB	12
Количество символов на RB	7
Расстояние между поднесущими	15 кГц
Размер RBG	3
Разделение каналов	FDD
Несущая частота	1800 МГц
Модель канала	UMi
Конфигурация антенны	SISO
HARQ	Отключен
Алгоритмы планирования	RR, PF, Best CQI
Мощность базовой станции	36 дБм
Количество базовых станций	1
Количество пользователей	3
Классы пользователей	Пешеход, автомобиль
Модель передвижения пользователей	Random Walk
Модель трафика	Full Buffer

3.2. Результаты симуляции

Рассмотрим подробнее метрики, на основе которых изучалась работа планировщиков. Первая метрика – пропускная способность, измеряется как общее количество бит, успешно переданных по каналу от базовой станции до пользовательского устройства в единицу времени симуляции (бит/с):

$$\text{Throughput}_n = \frac{B_n}{t_{\text{sim}}}, \quad (6)$$

$$\text{Throughput}_{\text{cell}} = \sum_{n=1}^N \text{Throughput}_n,$$

где B_n – это число переданных бит от пользовательского устройства n до базовой станции в пределах соты $cell$; t_{sim} – это время симуляции, за которое были переданы биты.

Временные диаграммы изменения пропускной способности соты для каждого планировщика отображены на рисунке 5. Для удобства, пропускная способность указана в Мбит/с. Важно отметить, что в расчете пропускной способности рассматривается полная емкость RB. Учитывается как служебная информация, передаваемая в RB, так и полезная нагрузка. Для планировщика RR в условиях симуляции пропускная способность соты остается в эталонных значениях и схожа с исследованиями, проведенными в других симуляторах [2, 14].

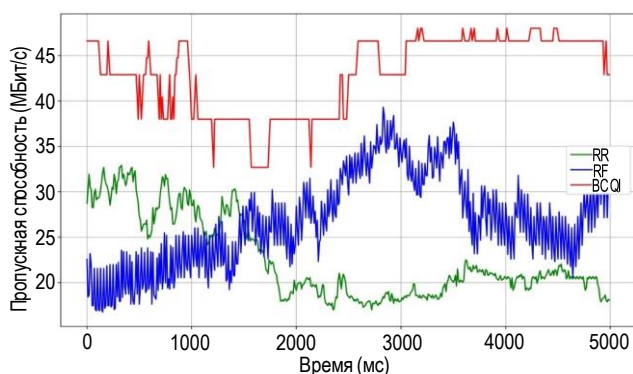


Рис. 5. График пропускной способности соты. Все планировщики

Fig. 5. Cell Throughput. All Schedulers

Для наглядности представлены графики пропускной способности каждого пользователя на протяжении всей симуляции с помощью диаграммы размаха (рисунок 6). За время симуляции передвижение абонентов было незначительным, однако, они находились на разных расстояниях от базовой станции, что повлияло на схему кодирования и модуляцию, и как следствие, на количество передаваемых бит.

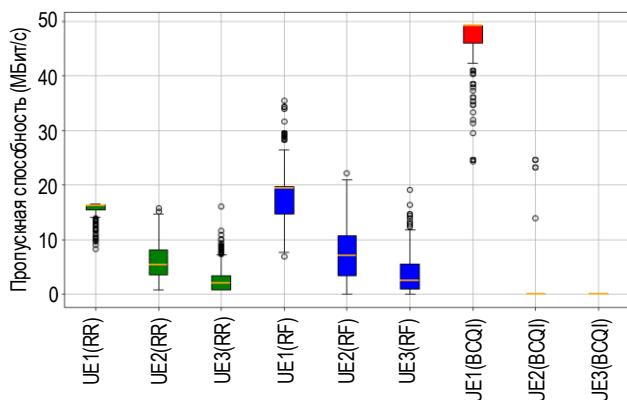


Рис. 6. Диаграмма размаха пропускной способности пользователей. Все планировщики

Fig. 6. User Throughput Boxplot. All Schedulers

Метрика Jain's Fairness Index оперирует понятием справедливости распределения общего частотно-временного ресурса между всеми пользователями и отражает то, насколько равные условия обеспечиваются для всех пользователей.

Рассчитать индекс справедливости можно по следующей формуле [16]:

$$\text{Fairness} = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (7)$$

где N – количество пользователей в соте; X_i – достигнутая пропускная способность пользователя i , Мбит/с.

Зная пропускные способности пользователей, можно перейти к расчету индекса справедливости; результаты представлены на рисунке 7.

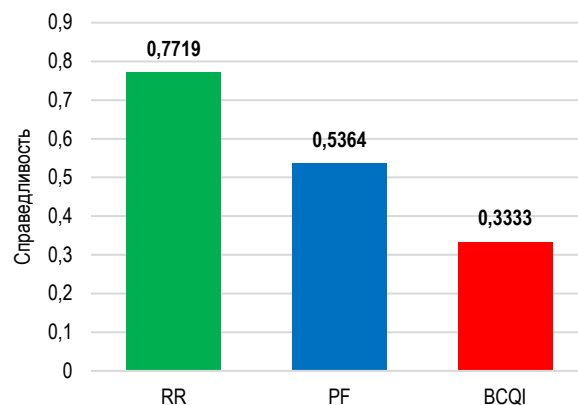


Рис. 7. Индекс справедливости для планировщиков RR, PF, Best CQI

Fig. 7. Jain's Fairness Index for RR, PF, Best CQI Schedulers

Полученные значения демонстрируют ожидаемое поведение планировщиков согласно их алгоритмической природе. Для количественного сравнения с результатами других исследований необходимо точное воспроизведение условий моделирования (количество пользователей, их расположение, модели канала), что планируется в рамках дальнейших исследований. Ключевым результатом является подтверждение качественного поведения: Best CQI показывает наименьшую справедливость, RR – наибольшую, а PF занимает промежуточное положение, что соответствует теоретическим ожиданиям.

Обращая внимание на график (см. рисунок 7), можно увидеть, что Best CQI вписывается в эталонные значения, а для PF и RR они получились ниже, чем ожидалось. Связано это, прежде всего с тем, что пользователи поставлены изначально в разные условия канала, а значит, их максимально достижимая пропускная способность ограничена модуляцией и отличается. Если указать пользователям одинаковые расстояния от базовой станции и уравнять состояния каналов, то мы обнаружим требуемые значения индекса справедливости для всех трех планировщиков.

Следующей исследуемой метрикой является спектральная эффективность, показывающая, насколько результативно используются ресурсы спектра в выделенной ширине полосы. Единицы измерения – бит/с/Гц. Это подходящая метрика для оценки планировщиков, так как эффективное использование ресурсов спектра их основная задача. Оценивать ее будем с помощью CDF – функции распределения вероятностей, по итогам получения всех значений в симуляции:

$$\text{SE} = \frac{\text{Throughput}}{W}, \quad (8)$$

$$\text{CDF} = F_{\text{SE}}(x) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N 1_{\{\text{SE}_i \leq x\}},$$

где Throughput – пропускная способность из (7), бит/с; W – полоса частот, Гц; K – общее число измерений; $1_{\{SE_i \leq x\}}$ – индикаторная функция CDF, равна 1, если условие выполняется, иначе – 0.

Полученные значения спектральной эффективности для каждого планировщика в единицу времени симуляции отобразим в общем графике на рисунке 8.

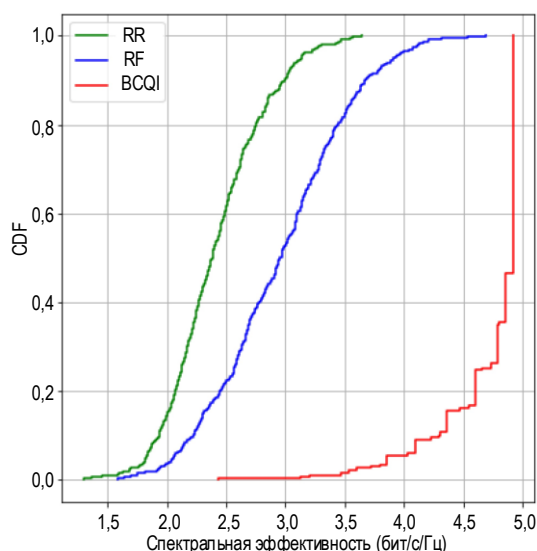


Рис. 8. Изменение спектральной эффективности соты во время симуляции при разных планировщиках

Fig. 8. Cell Spectral Efficiency Cumulative Distribution Function. All schedulers

Согласно рисунку 8, можно сделать вывод, что максимальных значений спектральной эффективности в заданных условиях симуляции можно добиться с помощью планировщика Best CQI, и это действительно так, ведь наибольшее количество ресурсов отдается пользователю с наилучшим состоянием канала, и, как следствие, наивысшей модуляцией (QAM-64). При этом сама функция демонстрирует характерную ступенчатость, с концентрацией на крайних значениях. PF планировщик дает выигрыш на фоне обычного циклического распределения RR, обеспечивая баланс между справедливостью и эффективностью, без кардинального ущерба пользователям на краю соты (график плавно возрастает). В целом, анализируя CDF, можно сделать заключение, что поведение планировщиков соответствует теоретическим ожиданиям [2].

Заключение

Универсальные симуляторы, такие как ns-3, OM-Net++, MATLAB, обладают преимуществами, которые не имеют большой значимости в исследуемой задаче. Например, ns-3 обеспечивает реалистичные модели для имитации поведения пакетных сетей передачи данных, включая поддержку Wi-Fi, WiMAX, LTE и других технологий. OMNeT++ демон-

стрирует высокую гибкость настройки и масштабируемость, что подтверждается его применением в исследованиях многополосных когнитивных радиосетей. Vienna LTE Simulator специализируется на детальном моделировании физического уровня LTE, предоставляя точные модели каналов и алгоритмов планирования.

Специализированные модели, ориентированные на конкретную предметную область, обеспечивают принципиально иной подход к решению исследовательских задач. В отличие от универсальных симуляторов, специализированная модель планирования ресурсов концентрирует вычислительные ресурсы на детальном моделировании процессов MAC-уровня, исключая накладные расходы на симуляцию протоколов. Это позволяет достичь более высокой точности моделирования критически важных процессов – распределения ресурсных блоков, адаптивной модуляции, взаимодействия планировщика с буферами пользователей.

Результаты, полученные в ходе эксперимента в рамках имитационной модели, показывают, что разработанная модель демонстрирует хорошую согласованность с теоретическими принципами и практическими результатами, описанными в исследованиях [2, 8, 14]. На примере базового сценария подтверждаются основные принципы работы классических алгоритмов планирования, действующих в сетях мобильной связи. Для RR получен корректный индекс справедливости при равномерном и неравномерном распределении пользователей по качеству каналов, продемонстрирован принцип циклического распределения ресурсов. Достижимая пропускная способность соты и спектральная эффективность для Best CQI при низкой справедливости согласуется с фундаментальными ограничениями алгоритма. PF по всем метрикам доказывает достижение компромисса, обеспечивая баланс и хорошую пропускную способность для пользователей сети.

Проведенный базовый эксперимент подтвердил корректность функционирования разработанной модели и адекватность ее поведения теоретическим принципам работы планировщиков. Модель продемонстрировала гибкость настройки параметров и готовность к проведению более масштабных исследований с увеличенным количеством пользователей, различными сценариями мобильности и детальным сравнением с результатами других симуляторов.

Модель позволяет получать обширное количество сценариев симуляции, что открывает возможности для дальнейших исследований. Реализация функционала, основанного на технических спецификациях 3GPP, обеспечивает достоверность результатов и допустимые отклонения от реалий работы сети.

На данном этапе в модели существует ряд допущений и ограничений, которые станут драйвером дальнейшего развития. В том числе реализация процесса повторной передачи HARQ, механизмов возникновения и борьбы с ошибками на уровне РНУ, организация работы с QoS-трафиком, реализация и испытание QoS-Aware-планировщиков. Интерес представляет исследование алгоритмов планирования, основанных на механизмах ML и обучения с подкреплением (DRL-планировщики), актуальность исследования которых подтверждается в [17, 18]. Также модель не ограничена в возможностях развития решения в сторону мобильных сетей связи 5G. Ведется активная работа по устранению вышеуказанных проблем. Ближайшие планы раз-

вития модели включают поэтапное внедрение интеллектуальных алгоритмов планирования ресурсов. На следующем этапе (Q3-Q4 2025) предполагается реализация DRL-планировщиков и их испытания в рамках модели согласно различным сценариям. Дополнительно проводится расширение функционала модели для поддержки различных функций, включая обработку QoS, и имитацию IoT-устройств.

Для обеспечения воспроизводимости результатов и дальнейшего развития исследований исходный код модели размещен в открытом доступе (https://github.com/sherokiddo/project_py_scheduler). Репозиторий регулярно обновляется и дорабатывается документация.

Список источников

1. Liang D., Dou X. Research on the Technology of Breaking the Shannon Channel Capacity and Shannon Limit // Research Square. 2022. DOI:10.21203/rs.3.rs-1643836/v1
2. Ashfaq K., Safdar G.A., Ur-Rehman M. Comparative analysis of scheduling algorithms for radio resource allocation in future communication networks // Peer J Computer Science. 2021. Vol. 7. P. e546. DOI:10.7717/PEERJ-CS.546. EDN:SNOOJB
3. Noman H.M.F., Hanafi E., Noordin K.A., Dimiyati K., Hindia M.N., Abdrabou A. Machine Learning Empowered Emerging Wireless Networks in 6G: Recent Advancements, Challenges and Future Trends // IEEE Access. 2023. Vol. 11. PP. 83017–83051. DOI:10.1109/access.2023.3302250. EDN:PXCKFF
4. Zaidi S.M.A., Manalastas M., Farooq H., Imran A. SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and beyond // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 82938–82950. DOI:10.1109/access.2020.2991959. EDN:SPFZRY
5. Manalastas M., Farooq M.U.B., Zaidi S.M.A., Qureshi H.N., Sambo Y., Imran A. From Simulators to Digital Twins for Enabling Emerging Cellular Networks: A Tutorial and Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. Vol. 27. Iss. 4. PP. 2693–2732. DOI:10.1109/COMST.2024.3490178
6. ETSI TS 136 321 V16.6.0 (2021-10) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 16.6.0 Release 16).
7. ETSI TS 136 213 V15.14.0 (2021-09) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. (3GPP TS 36.213 version 15.14.0 Release 15).
8. Marinescu A., Macaluso I., DaSilva L.A. System Level Evaluation and Validation of the ns-3 LTE Module in 3GPP Reference Scenarios // Proceedings of the 13th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Miami, USA, 21–25 November 2017). New York: Association for Computing Machinery, 2017. PP. 59–64. DOI:10.1145/3132114.3132117
9. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // Wireless Communications and Mobile Computing. 2002. Vol. 2. Iss. 5. PP. 483–502. DOI:10.1002/wcm.72
10. Самуйлов К.Е., Гайдамака Ю.В., Шоргин С.Я. Применение моделей случайного блуждания при моделировании перемещения устройств в беспроводной сети // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. № 4. С. 2–8. DOI:10.14357/19922264180401. EDN:VOGJOL
11. ETSI TR 138 901 V18.0.0 (2024-05) Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 18.0.0 Release 18).
12. Andreev S., Anisimov A., Koucheryavy Y., Turlikov A. Practical Traffic Generation Model for Wireless Networks // In: M. Brogle, E. Osipov, T. Braun, G. Heijenk (eds.) Fourth Ercim Workshop on Emobility. 2010. PP. 61–72.
13. Marvi M., Aijaz A., Khurram M. On the Use of ON/OFF Traffic Models for Spatio-Temporal Analysis of Wireless Networks // IEEE Communications Letters. 2019. Vol. 23. Iss. 7. PP. 1219–1222. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2917681
14. Grøndalen O., Zanella A., Mahmood K., Carpin M., Rasool J., Østerbø O.N. Scheduling Policies in Time and Frequency Domains for LTE Downlink Channel: A Performance Comparison // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 4. PP. 3345–3360. DOI:10.1109/TVT.2016.2589462
15. Srinivasa R.K., Kumar H. Simplified Framework for Benchmarking Standard Downlink Scheduler over Long Term Evolution // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. Vol. 12. Iss. 5. PP. 756–763. DOI:10.14569/IJACSA.2021.0120136. EDN:MMQQBE
16. Jain R.K., Chiu D.-M., Hawe W.R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems // ACM Transactions on Computer Systems. 1984. Vol. 2. Iss. 1. PP. 1–38.
17. Wang J., Zhuang Z., Qi Q., Li T., Liao J. Deep reinforcement learning for scheduling in cellular networks // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 82. P. 105557. DOI:10.1016/j.asoc.2019.105557. EDN:QJAGBG
18. Брагин К.И., Тычинкин С.А. Применение алгоритмов машинного обучения для управления ресурсами в мобильных сетях 5G // III Международная научно-практическая конференция «Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики» (Екатеринбург, Российская Федерация, 25–26 января 2023 г.). Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 88–91. EDN:LRXLAF

References

1. Liang D., Dou X. Research on the Technology of Breaking the Shannon Channel Capacity and Shannon Limit. *Research Square*. 2022. DOI:10.21203/rs.3.rs-1643836/v1
2. Ashfaq K., Safdar G.A., Ur-Rehman M. Comparative analysis of scheduling algorithms for radio resource allocation in future communication networks. *Peer J Computer Science*. 2021;7:e546. DOI:10.7717/PEERJ-CS.546. EDN:SN00JB
3. Noman H.M.F., Hanafi E., Noordin K.A., Dimiyati K., Hindia M.N., Abdrabou A. Machine Learning Empowered Emerging Wireless Networks in 6G: Recent Advancements, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*. 2023;11:83017–83051. DOI:10.1109/access.2023.3302250. EDN:PXCKFF
4. Zaidi S.M.A., Manalastas M., Farooq H., Imran A. SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and beyond. *IEEE Access*. 2020;8:82938–82950. DOI:10.1109/access.2020.2991959. EDN:SPFZRY
5. Manalastas M., Farooq M.U.B., Zaidi S.M.A., Qureshi H.N., Sambo Y., Imran A. From Simulators to Digital Twins for Enabling Emerging Cellular Networks: A Tutorial and Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2024;27(4):2693–2732. DOI:10.1109/COMST.2024.3490178
6. ETSI TS 136 321 V16.6.0 (2021-10) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 16.6.0 Release 16)*.
7. ETSI TS 136 213 V15.14.0 (2021-09) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. (3GPP TS 36.213 version 15.14.0 Release 15)*.
8. Marinescu A., Macaluso I., DaSilva L.A. System Level Evaluation and Validation of the ns-3 LTE Module in 3GPP Reference Scenarios. *Proceedings of the 13th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks, 21–25 November 2017, Miami, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2017. p.59–64. DOI:10.1145/3132114.3132117
9. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2002;2(5):483–502. DOI:10.1002/wcm.72
10. Samuilov K.Ye., Gaidamaka Yu.V., Shorgin S.Ya. Modeling movement of devices in a wireless network by random walk models // *Informatics and applications*. 2018;12(4):2–8. (in Russ.) DOI:10.14357/19922264180401. EDN:VOGJOL
11. ETSI TR 138 901 V18.0.0 (2024-05) *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 18.0.0 Release 18)*.
12. Andreev S., Anisimov A., Koucheryavy Y., Turlikov A. Practical Traffic Generation Model for Wireless Networks. In: *M. Brogle, E. Osipov, T. Braun, G. Heijenk (eds.) Fourth Ercim Workshop on Emobility*. 2010. p.61–72.
13. Marvi M., Aijaz A., Khurram M. On the Use of ON/OFF Traffic Models for Spatio-Temporal Analysis of Wireless Networks. *IEEE Communications Letters*. 2019;23(7):1219–1222. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2917681
14. Grøndalen O., Zanella A., Mahmood K., Carpin M., Rasool J., Østerbø O.N. Scheduling Policies in Time and Frequency Domains for LTE Downlink Channel: A Performance Comparison. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017;66(4):3345–3360. DOI:10.1109/TVT.2016.2589462
15. Srinivasa R.K., Kumar H. Simplified Framework for Benchmarking Standard Downlink Scheduler over Long Term Evolution. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021;12(5):756–763. DOI:10.14569/IJACSA.2021.0120136. EDN:MMQQBE
16. Jain R.K., Chiu D.-M., Hawe W.R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems. *ACM Transactions on Computer Systems*. 1984;2(1):1–38.
17. Wang J., Zhuang Z., Qi Q., Li T., Liao J. Deep reinforcement learning for scheduling in cellular networks. *Applied Soft Computing*. 2019;82:105557. DOI:10.1016/j.asoc.2019.105557. EDN:QJAGBG
18. Bragin K.I., Tychinkin S.A. Application of Machine Learning Algorithms for Resource Management in 5G Mobile Networks. *Proceedings of the IIIrd International Scientific and Practical Conference "Infocommunication Technologies: Current Issues of the Digital Economy"*, 25–26 January 2023, Yekaterinburg, Russian Federation. Yekaterinburg: Ural State Transport University Publ.; 2023. p.88–91. (in Russ.) EDN:LRXLAF

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 01.10.2025.

The article was submitted 08.07.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 01.10.2025.

Информация об авторах:

БРАГИН
Кирилл Игоревич

старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0000-0003-4334-0307>

НОРИЦИН
Иван Алексеевич

стажер отдела разработки алгоритмов уровня доступа к среде ООО «Ядро Центр Технологий Мобильной Связи»
 <https://orcid.org/0009-0000-9552-0129>

ДРОЗДОВА
Вера Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и вычислительных средств Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0009-0002-0427-9929>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.391.64

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118>

EDN:UMHYVG



Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях

Ирина Леонидовна Виноградова^{1,2}, vil-4@mail.ru
 Альберт Ханович Султанов¹, sultanov.ah@mail.ru
 Евгения Юрьевна Головина³ ✉, egolovina82@mail.ru
 Аркадий Михайлович Комиссаров¹, arkadiy_kom@mail.ru
 Павел Евгеньевич Филатов¹, filatov.pe@ugatu.su

¹Уфимский университет науки и технологий,
 Уфа, 450076, Российская Федерация

²Уфимский государственный нефтяной технический университет,
 Уфа, 450064, Российская Федерация

³Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате,
 Салават, 453250, Российская Федерация

Аннотация

Технологии *beamforming* в 5G / 6G и *fractional lambda switching* невозможны без быстрой (за времена <1 нс) пакетной коммутации. Существующие средства на микрорезонаторах и подобные ориентированы на малофотонные сигналы и не эффективны на традиционных волоконно-оптических линиях по G.703/G.802.3ba. Поэтому **актуальными** являются методы и устройства быстрой коммутации оптических пакетов.

Цель работы: создание нового нереляционного метода быстрой коммутации сигналов / пакетов в полностью оптических сетях на базе чирпа импульсов. Научной задачей является разработка многопортового интерференционного устройства разделения по длинам волн с малым шагом.

Используемые методы: численное моделирование в пакете HFSS, методы теории вероятностей.

В ходе **решения научной задачи** получена интерференционная картина в рабочей области устройства, спроектировано спектрально избирательное выходное зеркало, и уточнен градиент показателя преломления.

Новизна: предложен метод быстрой оптической коммутации, двухрезонаторное устройство разделения с разработанной структурой выходного зеркала и уточненным показателем преломления.

Практическая значимость: устройство предназначено для пакетных сетей 5G / 6G без буферизации.

Результаты работы интересны при проектировании новых поколений оптических коммутаторов.

Практическая реализация устройства повышает производительность сетей с коммутацией пакетов.

Ключевые слова: волоконно-оптическая коммутация пакетов, двухрезонаторный интерферометр Фабри – Перо, оптический смеситель, градиент показателя преломления, дробное лямбда-коммутация

Финансирование: Работа выполнена в рамках конкурса лидерских проектов УГНТУ 2025 (№ В-17022).

Ссылка для цитирования: Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Головина Е.Ю., Комиссаров А.М., Филатов П.Е. Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 97–118. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118. EDN:UMHYVG

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118>

EDN:UMHYVG

Fast Optical Switching: Analysis of Existing Solutions and a New Method Ensuring Signal/Packet Switching in Multi-Service Networks

- ✉ Irina L. Vinogradova^{1,2}, vil-4@mail.ru
✉ Albert H. Sultanov¹, sultanov.ah@mail.ru
✉ Evgeniya Yu. Golovina³ ✉, egolovina82@mail.ru
✉ Arkadiy M. Komissarov¹, arkadiy_kom@mail.ru
✉ Pavel E. Filatov¹, filatov.pe@ugatu.su

¹Ufa University of Science and Technology,
Ufa, 450076, Russian Federation

²Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, 450064, Russian Federation

³Institute of Oil Refining and Petrochemistry of FSBEU VO "UGNTU" in Salavat,
Salavat, 453250, Russian Federation

Annotation

Beamforming technologies in 5G / 6G and fractional lambda switching are impossible without fast (in times <1 ns) packet switching. Existing microresonator devices and the like are focused on low-photon signals and are not effective on traditional G.703/G.802.3ba fiber-optic lines. Therefore, methods and devices for fast switching of optical packets are relevant.

The purpose of the work: to create a new non-relational method for fast switching of signals / packets in fully optical networks based on chirp pulses. The scientific task is to develop a multi-port interference wavelength separation device with a small step.

Methods used: numerical modeling in the HFSS package, methods of probability theory.

In the course of solving the scientific problem, an interference pattern was obtained in the working area of the device, a spectrally selective output mirror was designed, and the refractive index gradient was refined.

Novelty: a method of fast optical switching, a two-resonator separation device with a developed output mirror structure and a refined refractive index is proposed.

Practical significance: the device is designed for packet 5G / 6G networks without buffering.

The results of the work are interesting when designing new generations of optical switches.

The practical implementation of the device improves the performance of packet-switched networks.

Keywords: fiber optic packet switching, dual-cavity Fabry – Perot interferometer, optical mixer, refractive index gradient, fractional lambda switching

Funding: The work was completed within the framework of the Ufa State Petroleum Technological University leadership projects competition 2025 (No. V-17022).

For citation: Vinogradova I.L., Sultanov A.H., Golovina E.Yu., Komissarov A.M., Filatov P.E. Fast Optical Switching: Analysis of Existing Solutions and a New Method Ensuring Signal/Packet Switching in Multi-Service Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):97–118. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118. EDN:UMHYVG

Введение

В настоящее время справедливо говорить о повышении интереса к оптической коммутации для телекоммуникационных систем. Наряду с расши-

рением областей применения сетевых технологий, ставших уже традиционными: xWDM для уплотнения каналов, λ -коммутации и маршрутизации, полностью оптической обработки сигналов, обес-

печивающих перевод управления на нижние уровни для ускорения работы сетей [1], появляются и новые, не имевшие ранее аналогов, технологии и приложения. В отношении последнего можно привести два характерных примера. Это: 1) технология beamforming в 5G / 6G наряду с использованием оптически управляемых антенных решеток для радиосетей миллиметрового диапазона [2, 3] самого разного назначения, и 2) оптические коммутационные системы в центрах обработки данных (ЦОД) [4].

В первом примере – в связи с увеличением частоты радионесущей снижается ее способность проникновения в городскую инфраструктуру, а значит, согласно [2], это приводит к необходимости использования высоконаправленной радиопередачи и работы с узкими лучами. Что, в свою очередь, требует быстрой динамической перестройки элементов антенной решетки для корректного поддержания нескольких направленных лучей в системе, например, с MIMO. Причем сказанное актуально как для передающей, так и для принимающей стороны, отслеживающей луч. Если быстроедействие окажется недостаточным, то может иметь место потеря связи в мобильных сетях mmWave UDN (аббр. от англ. Ultra-Dense Networks – сверхплотные сети), которым свойственно динамическое изменение топологии и так называемый сервис «нарезки услуг» (service-aware slicing) [2]. Учитывая критический характер зависимости времени переключения в оптической схеме на формирование радиолуча, в настоящее время разрабатываются даже специализированные алгоритмы управления решателем [5], призванные минимизировать задержку передачи в коммутационной части радиосистемы (fronthaul) для mmWave UDN / C-RAN [6].

Во втором примере с коммутационными схемами ЦОД, по мнению авторов [4], электронным коммутаторам на смену неизбежно должны прийти оптические. Причем требование по быстродействию – до «субволнового времени» на установление соединения, обусловлено необходимостью работать также и в режимах всплесков трафика. Причем указанное требование неуклонно повышается наряду с необходимостью повышения энергоэффективности устройств переключения. Сюда же можно отнести и задачу оптической пакетной коммутации (OBS, аббр. от англ. Optical Burst Switching) как для ЦОД, так и других типов высокоскоростных сетей. В [7] подчеркивается, что эффективное снижение накладных расходов на управление в режиме с OBS может обеспечиваться применением коммутаторов с временами реконфигурации до 1 нс, в то время как на сегодняшний день, в соответствии с [3], ультранизкой задержкой уже считается время в пределах 0,1 мс.

Последнее явно не обеспечивает условие эффективной работы с OBS. Поэтому разрабатываемые оптические схемы коммутации для ЦОД [8] используют существующее оборудование xWDM с устройствами разделения по длинам волн, основанными на циркуляторах и оптоволоконных Брэгговского типа с большой шириной спектра – до нескольких микрометров (рисунок 1). Но даже и такие решения, согласно [8], позволяют повысить эффективность работы ЦОД.

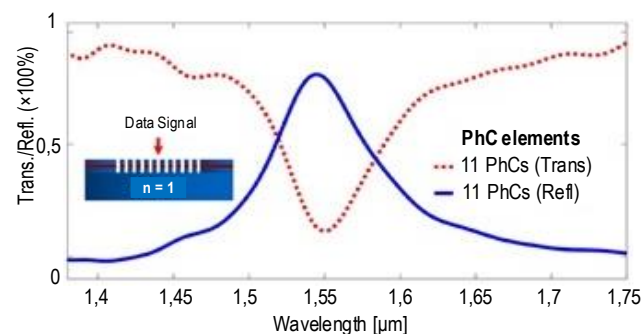


Рис. 1. Пример спектральной характеристики оптического устройства коммутации в ЦОД. Инвертирование спектра (пунктирная и непрерывная линии) связано со спецификой схемотехники коммутации (взято из [8])

Fig. 1. Example of Spectral Characteristics of an Optical Switching Device in a Data Center. Spectrum Inversion (Dotted and Continuous Lines) is Related to the Specifics of the Switching Circuitry (taken from [8])

Анализируя сказанное, можно сделать два характерных заключения. Во-первых, задача разработки высокоскоростных и энергоэффективных оптических переключателей / коммутаторов, управление которыми выполняется также оптическим способом, обладает актуальностью. И самый лучший вариант, если это управление – нереляционное [9], т. е. управляющая информация / воздействие переносится в самом переключаемом потоке / сигнале. Наличие подобных переключателей позволит кардинально изменить саму инфраструктуру высокоскоростных сетей, что значительно превзойдет по итоговой эффективности применение всевозможных вспомогательных средств, таких как ускоряющие коммутационные алгоритмы для решателя, алгоритмы, комбинирующие преобразование длин волн с волоконно-оптическими линиями задержки, протоколы маршрутизации отклонения [4, 5, 7], и подобные средства. И, во-вторых, напрашивается классификация рассматриваемых устройств на коммутаторы оптических потоков (или каналов), к классу которых можно отнести подавляющее большинство применяемых на оптических сетях в настоящее время переключателей, и коммутаторы сигналов (или пакетных сообщений, т. е. пакетов). Очевидно, что быстродействие последних должно быть весьма высоким – время на установление соединения не превышать долей наносекунд, и менее, что обусловлено короткой длительностью пакета / байта / бита в современных сетях.

Краткий обзор известных оптических переключателей / коммутаторов

Над созданием устройств переключения (перенаправления) оптических потоков для волоконно-оптических сетей (ВОС) работы ведутся достаточно давно, и к настоящему моменту уже разработана и серийно изготавливается целая линейка моделей [10]:

- оптические коммутаторы с механически перемещающимся элементом, коммутирующим световой поток от входных оптических портов к выходным; таким коммутирующим элементом может быть поворачиваемый отрезок оптического волновода, призма, зеркала, 3D-микроэлектромеханические переключатели (MEMS, *аббр. от англ. Micro-Electro-Mechanical Systems*) или направленный звездообразный / древовидный разветвитель с переменным коэффициентом связи; для перемещения элемента обычно используют пьезоэлементы или шаговые двигатели; известные модели, как правило, малоактуальны для информационных потоков ВОС за исключением оборудования тестирования и мониторинга, включая – средства служебной связи;

- электрооптические коммутаторы, основанные на изменении коэффициента связи под действием приложенного напряжения за счет электрооптического эффекта, например, в направленном разветвителе, либо в матрице дисплеев на жидких кремниевых кристаллах (LCoS, *аббр. от англ. Liquid Crystal on Silicon*), фокусирующем световой поток на одном из выходных портов устройства; известные модели обеспечивают скорости переключения до 108–109 Гц с низким управляющим напряжением (5–10 В);

- акустооптические коммутаторы, основанные на дифракции света на акустических волнах, представляющих собой фазовую дифракционную решетку неоднородностей показателя преломления, движущуюся со скоростью звука; последняя генерируется, как правило, пьезоэлектрическим устройством в такой акустооптической ячейке; управление достигается тем, что при изменении частоты звуковой волны изменяется и угол отклонения (дифракции) световой волны относительно угла падения;

- термооптические коммутаторы, базирующиеся на изменении коэффициента преломления рабочей среды под действием температуры с последующим анализом фазы проходящего излучения, например, в интерферометре Маха-Цендера (MZI, *аббр. от англ. Mach-Zehnder Interferometer*). Недостатком таких переключателей является относительно высокое энергопотребление и невысокие скорости выхода на режим.

Перечисленные типы моделей так или иначе используются для ВОС, но с точки зрения рассмат-

риваемой задачи их, скорее можно отнести к коммутаторам оптических потоков (некоторое исключение составляют электрооптические), к тому же ни о каком оптическом управлении не может идти речи. Кроме того, они являются реляционными, т. е. требуют отдельно подаваемого (передаваемого) управляющего воздействия. Последнее не только неизбежно будет занимать телекоммуникационный ресурс, но и потребует специализированного устройства (например, преобразователя оптика / электричество если все же передается по оптической сети в виде служебного сигнала), либо, что еще сложнее – специализированного канала передачи.

Близкой технологией к рассматриваемым примерам является построение так называемого оптического (волоконно-оптического) суперканала¹, когда единым чипом (суперканальной линейной картой, далее – СЛК) управляется передача клиентских данных и устанавливаются значения несущих оптических длин волн. С точки зрения линейного сигнала, это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов (ближе, чем того требует G.694), которые при прохождении по ВОС должны управляться оптическими маршрутизаторами и коммутаторами как единое целое. Предполагается также, что СЛК при реконfigurировании изменяет не какую-либо одну несущую, как это классически свойственно xWDM, а всю совокупность несущих в целом, что значительно упрощает алгоритм и схему управления, а значит – увеличивает и скорость переключения.

Очевидно, что технология суперканала ориентирована на высокоскоростные ВОС и в настоящее время успешно справляется с данной задачей. Но, во-первых, система не является полностью оптической и характеризуется реляционным управлением, и, во-вторых, классифицируется как коммутатор потоков / каналов. Хотя, возможно, по быстродействию СЛК и могла бы обеспечить коммутацию пакетов в городских сетях (категории MAN [8]: xPON, FTTH и подобных), но аппаратно она сугубо для этого не предназначена. К тому же технология СЛК работает при поддержке буферизации¹.

Сказанное выше свидетельствует о назревшей необходимости в разработке оптических устройств, коммутирующих сигналы / пакеты. В связи с чем телекоммуникационными научными группами предлагаются подходы к построению так называемых «быстрых оптических переключателей» [11–15] (Ultrafast All-Optical Switching), по тематике которых уже немало публикаций. Принцип работы устройств,

¹ Основы технологии DWDM // Компания T8. URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrарx7a89we9in5xc7cf8e8604a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 01.07.2025)

в основном, базируется на эффекте изменения связи мод в субволновых решетчатых и фотонно-кристаллических структурах за фемтосекундные времена и даже быстрее. Такие переключатели успешно смогут применяться в квантовых оптических сетях и для внутричиповых решений, в которых переключение фактически сводится к перенаправлению единственного фотона. Для многофотонных сигналов, свойственных всем видам существующих сегодня ВОС и регламентированных по мощности (согласно G.703 – это 1 мВт), представленные в [11–15] и подобных источниках принципы коммутации вряд ли окажутся применимыми. К тому же подобные схемы могут работать в режиме «включено–выключено», или в лучшем случае – к выбору одного из двух направлений. Следовательно, для построения многопортовых коммутаторов понадобилось бы их каскадное включение (это же касается и многих других моделей, представленных выше), что неизбежно усложнит не только конструкцию, но и управление устройством.

Для наглядного представления описанных выше принципов коммутации они сведены в таблице 1, где использованы сокращения, связанные со спецификой конструкций.

1) Перенаправляющие входной поток / сигнал, исходя из его параметров (длины волны, состояния поляризации и пр.), не меняя собственной структуры и свойств (не перестраиваются – *НП*). Соответственно, являются не реляционными [8], и не требуют дополнительного канала управления. Практически не вносят задержку в сигнал, можно сказать – срабатывают за времена <1 пс.

2) Создают путь для входного сигнала, исходя из дополнительного управляющего воздействия, при этом, как правило, перенастраивают собственную структуру с изменением свойств (*П*). Соответственно, требуют дополнительного телекоммуникационного ресурса для управления; как правило, являются реляционными. Требуют на перестройку значительного времени: от наносекунд до десятков миллисекунд [2, 4].

ТАБЛИЦА 1. Принципы построения оптических коммутаторов / переключателей

TABLE 1. Principles of Designing Optical Switches

Многопортовые (коммутаторы), более 8		Малопортовые (вентили), 2÷4 выхода	
Волоконно-оптические однопролетные	Волоконно-оптические каскадные	На подложке (на чипе)	Волоконно-оптические
Волноводные решетчатые маршрутизаторы на волоконных структурах Брэгговского типа (AWGR, аббр. от англ. Arrayed Waveguide Grating Routers)* – НП		Микрорешетчатые структуры, включая резонансные дифракционные структуры, использующие связанность мод, включая плазменный резонанс – П	
	MZI + эффект Поккельса, Керра, термоподогрев – П		
		MZI с нелинейным сдвигом фазы (MZI-PPLN) – П	
	Микрокольцевые резонаторы* (MRR [4]) – НП, П	Микрорезонаторные структуры – НП, П	
	Акустооптические – П		
	Нелинейно-поляризационные структуры – П		
	Поворотное зеркало (возможно, + ЖК), MEMS – П		
		С использованием полупроводникового усилителя (SOA) – П	
		Полупроводниковый усилитель со средой на квантовых точках (CD-SOA) – П	
	MZI + SOA – П		
Для переключения оптических потоков (не предназначены для быстрой и постоянной перестройки) – целесообразны для систем с коммутацией каналов		Для переключения оптических сигналов (могут оперативно переключаться от одной информационной единицы к другой) – целесообразны для систем с коммутацией пакетов; но в большинстве работают с наномощностями и не подойдут для использования на традиционных ВОС	

*Как правило, характеризуются широкой спектральной линией ~0,1 нм [4]

С точки зрения разделения устройств по мощности, можно выделить:

1) волоконно-оптические – изготовлены преимущественно с самостоятельным соединением оптических волокон, по типу Y-разветвителей, с

минимальным использованием подложки, смешанных элементов и пр.; имеют миллиметровые / сантиметровые размеры; предназначены для работы со значительными мощностями (сотни мВт ÷ десятки мВт) переключаемых сигналов, а значит –

могут использоваться в составе традиционных ВОС;

2) на подложке – изготовлены в составе подложки, как правило, не имеют собственных (отдельных от подложки) входов / выходов в виде волоконных пигтейлов; имеют микронные / субмиллиметровые размеры, и менее; предназначены для работы с малыми мощностями: ($\text{нВт} \div \text{максимум единицы мкВт}$), вплоть до однофотонных сигналов; не могут использоваться в составе традиционных ВОС, а предназначены для логических схем (ЛС) в составе оптического, радиофотонного устройства, включая – для нанофотоники и квантовых технологий.

Таким образом, согласно представленному обзору, следует различать не только рабочие мощности устройств, но и базовый принцип переключения, основополагающим образом влияющий на быстродействие: перестройка внутренней структуры и связанное с этим изменение пути, и перенаправление, основанное на отличающихся параметрах сигнала. Очевидно, что быстродействие второго варианта многократно выше первого. Если во втором варианте отсутствуют каскадные схемы (наряду с многопортовостью, что важно для определенных задач), то это также повышает быстродействие. К тому же во втором варианте сохраняется нереляционность управления. Ясно также, что наиболее неизменным параметром сигнала (меткой) является длина волны излучения, что и используется в xWDM и GMPLS λ [1], и схемотехнически реализуется устройствами (в том числе – многопортовыми) с AWGR [1, 4, 7].

Следует заметить, что устройства с AWGR характеризуются весьма широкой спектральной линией; это вполне оправдано для магистральных ВОС. Однако, если рассматривать разветвленную оптическую линию с непротяженными сегментами, например, для управления антенной решеткой (АР) в системе Radio-over-Fiber (RoF) [16], то использование спектра по G.694 представляется, с одной стороны, высокорасточительным, а с другой – недостаточно быстро управляемым, даже (гипотетически) с привлечением технологии СЛК. Поэтому для экономии телекоммуникационного ресурса и обеспечения быстрого нереляционного переключения предлагается в качестве сигнальной метки использовать функцию чирпа [17] оптического импульсного сигнала внутри DWDM-канала совместно с узкоспектральным многопортовым волоконно-оптическим устройством разделения. В отличие от квантово-оптических решений, это позволит максимально сохранить существующую инфраструктуру ВОС, а также реализовать коммутацию оптических сигналов / пакетов, передаваемых в соответствии с G.703.

Волоконно-оптическое устройство для быстрого полностью оптического переключения

Узкоспектральное волоконно-оптическое устройство, реализующее метод быстрого полностью оптического переключения, может быть построено на базе двухрезонаторного интерферометра Фабри – Перо (ДИФП), представленного на рисунке 2а. Здесь предполагается, что переключение (перенаправление) сигнала происходит, исходя из его функции чирпа по аналогии с [18], управление которым выполняется на ранее расположенном элементе. Например, это может быть нелинейное специализированное оптоволокно, в котором функция чирпа подстраивается, исходя из мощности оптического сигнала [17]. Как показали ранее выполненные исследования [19], ДИФП обладает несколько большей резкостью интерференционной картины ζ , а значит – и большей разрешающей способностью, в сравнении с классическим интерферометром Фабри – Перо. Указанное свойство обусловлено наличием второго, связанного с первым (основным), резонатора – в виде волоконно-оптической петли обратной связи. Величина $\zeta_{\text{ДИФП}}$ зависит от соотношения мощностей в первом P_1 и во втором P_2 резонаторах. Максимальное значение $\zeta_{\text{ДИФП}}$ достигается, согласно [19], при $P_1/P_2 \sim 2,7...2,8$. Чтобы ДИФП получился многопортовым, главным образом – с большим количеством выходных световодов, например, для оптического управления АР [16], выходной торец (см. рисунки 2а, 2б) должен быть образован не единственным на выход (учитывая обязательно присутствующие торцы второго волоконного резонатора, образованного дополнительными световодами), а многими световодами. Если все световоды как на входном, так и выходном торце, выставлены в соответствующих единых плоскостях, после чего отполированы с нанесением отражающего покрытия, то ДИФП получится с плоскими зеркалами. Если же световоды на торце (торцах) собраны со смещением, как показано на рисунках 2б, 2с, то устройство будет спектрально избирательным и может либо вносить чирпирование в сигнал (если световоды второго резонатора также выставлены со смещением и имеют различные длины [20]: например, $l_1 < l_2 < l_3$), либо разделять входной сигнал, исходя из значения мгновенной длины волны $\lambda_{\text{мгн}}$, т.е. функции чирпа $C_\lambda(t)$ [17]. Сам по себе второй резонатор не является высокодобротным, и если $l_1 = l_2 = l_3$, то какой-либо дополнительной задержки в сигнал вноситься не будет, а резонирование будет происходить и для незначительного отличия длин волн.

Очевидно, что ДИФП с гребенчатыми торцами может характеризоваться большей сферой практических приложений, нежели с плоскими. Но в этом случае зеркало интерферометра является

сложным, которое только в самом первом приближении можно рассматривать как конически-наклонное [21] – при малых и близко расположенных ступеньках гребенки. Если ступеньки крупные (порядка λ_0 и более), то зеркало приобретает рельефную фактурную структуру, которая, очевидно, усугубляет разрушение конструктивной интерференции. Для компенсации указанного явления материал смесителя ДИФП предложено изготавливать неоднородным – с градиентом показателя преломления κ , рассчитанным в ранних

исследованиях [20] ($\kappa = \text{grad}(n(r, z))$), как показано на рисунке 2d), обеспечивающим восстановление стройного порядка гребней стоячей волны в смесителе (даже вблизи сложных зеркал) подобно тому, что свойственно ДИФП с плоскими зеркалами. В [22] предложен подход к получению материала неоднородного смесителя – с применением специальным образом обработанного двухфазного ситаллового стекла.

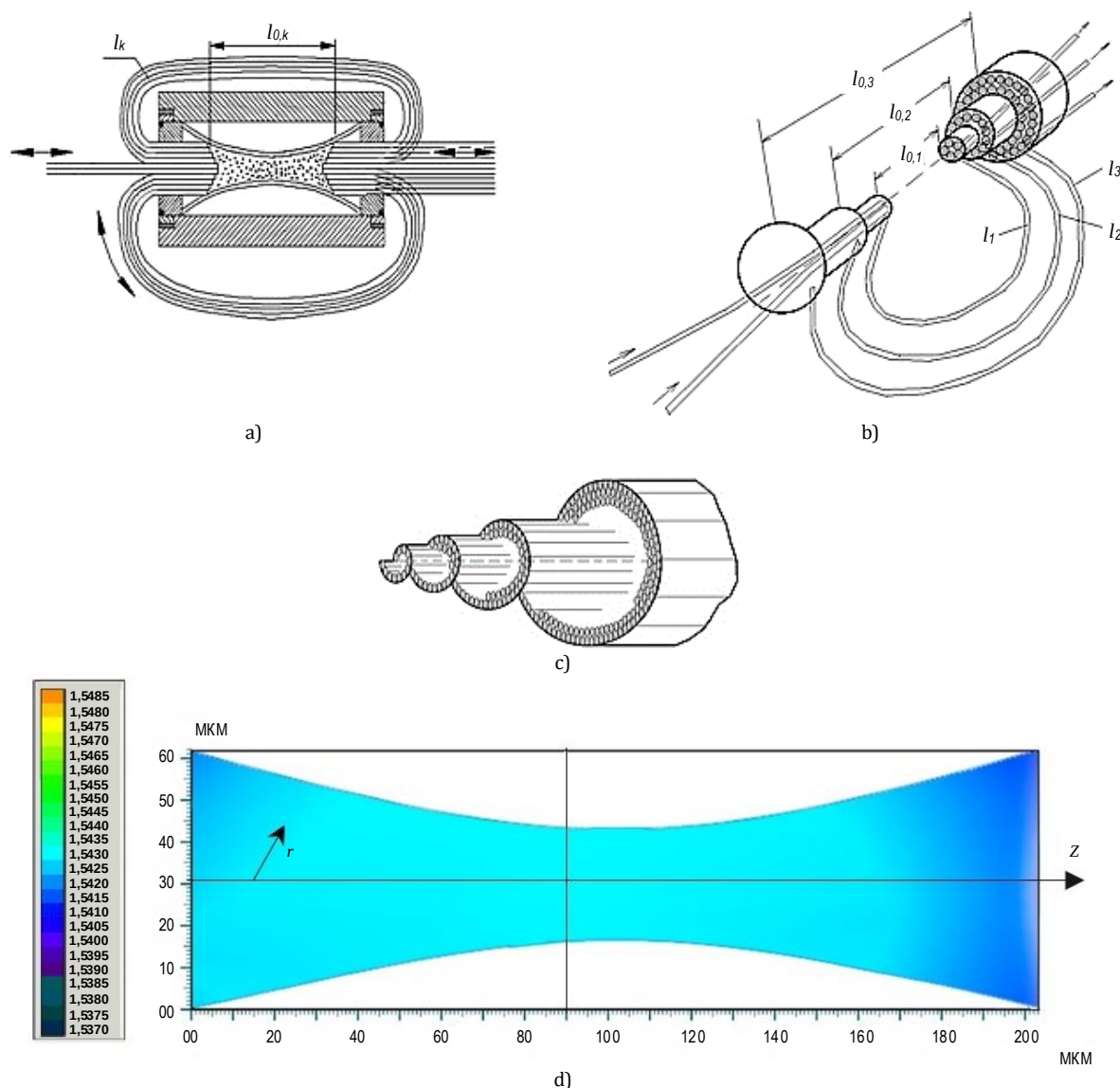


Рис. 2. ДИФП с неплоскими (гребенчатыми) торцами смесителя (a) и его конструктивные элементы: b) ступенчато-гребенчатые торцы с входными, выходными и дополнительными световодами, c) пример спирально-гребенчатого торца; d) градиент показателя преломления смесителя из [20]

Fig. 2. DIFP with Non-Planar (Comb) Mixer Ends (a) and its Design Elements: b) Stepped-Comb Ends with Input, Output and Additional Light Guides Forming the Second Resonator; c) an Example of a Spiral-Comb End; d) the Gradient of the Refractive Index of the Mixer from [20]

Здесь же подробнее остановимся на проектировании световодной гребенчатой структуры (гребенки), составляющей основу зеркал (зеркала) ДИФП, обеспечивающей, с одной стороны, эффективное разделение по выходным световодам chirпированного оптического сигнала в диапазоне 0,001...0,01 нм (таблица 2), с другой стороны – вносящей наименьшие искажения в интерференцию.

Последнее обеспечит необходимость в меньшем значении κ , что будет способствовать удешевлению устройства. Так как аналитически расчет параметров гребенчатого торца вряд ли можно выполнить эффективно, т. е. с получением сходящегося решения и точностью, составляющей хотя бы порядок точности входных данных, то целесообразно воспользоваться моделирующим пакетом.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение диапазонов длин волн для использования chirпированного сигнала в RoF-сети

TABLE 2. Comparison of Wavelength Ranges for Using a Chirped Signal in a RoF Network

№ п/п	Возможное значение, нм, $C_{\lambda, \max} = \Delta\lambda_{\max}$ (вблизи $\lambda_0 = 1550$ нм)	Соответствующая отстройка радиочастоты для схемы [17]	Специфика	Используем/ не используем
1	1	125 ГГц	$\Delta\lambda$ является отдельным λ -каналом в xWDM (по G.957 ширина спектральной линии Δ не должна превышать: $\Delta = 0,5$ нм для STM-16; 0,1 нм для STM-64+CWDM и 0,08 нм для STM-64+DWDM)	–
2	0,5	62,5 ГГц		
3	0,05	6,25 ГГц		
4	0,005	625 МГц	$\Delta\lambda$ не является отдельным λ -каналом в xWDM; при этом возможна работа радиоканала – с компенсатором дрейфа несущей (например, см. [23])	✓
5	$0,0005 = 5 \cdot 10^{-4}$	62,5 МГц	существенное повышение сложности изготовления и стоимости устройства	–

Здесь следует сделать пояснение: аналитический расчет амплитуды (электрической напряженности поля световой волны) $\vec{E}$ в рамках метода, базирующегося на приближении медленно изменяющейся амплитуде [17], предполагающего отбрасывание вторых производных от E как по координатам ($\partial^2 E / \partial r^2 \approx 0, \partial^2 E / \partial z^2 \approx 0$), так и по времени ($\partial^2 E / \partial t^2 \approx 0$), хорошо работающий для протяженной световодной структуры, вряд ли позволит получить приемлемую точность решения в рассматриваемой задаче. Аналитическое интегрирование уравнений второго порядка («в лоб») в граничных условиях, соответствующих конструкции, показанной на рисунке 2а, также не представляется возможным, в то время как численное интегрирование и является основой функционирования большинства соответствующих компьютерных пакетов. В данном случае был выбран пакет HFSS, позволяющий задавать как сложные конфигурации (с загрузкой чертежа из пакета AutoCAD), так и неоднородные области с требующимся градиентом, с возможностью последующей оптимизации конструкции (в том числе – и при решении обратной задачи).

Из-за того, что пакет HFSS ориентирован на моделирование СВЧ-систем (базируется на методе конечных элементов (FEM, аббр. от англ. Finite Element Method), то для применения его к оптической структуре (в основу многих специализированных пакетов: Lumerical, COMSOL, MEEP, Tidy3D и подобных, заложен метод конечных разностей во

временной области (FDTD, аббр. от англ. Finite Difference Time Domain)) сначала было выполнено сравнение результатов счета первого прогона с адаптивной сеткой в реперных точках с полученными ранее аналитическими результатами [16]. Результат сравнения удовлетворил авторов. Размеры конструкции задавались, исходя из пропорционального пересчета, что обосновывается линейностью явления интерференции. Так, показатель преломления n задавался через диэлектрическую проницаемость как $n \approx \sqrt{\epsilon}$ при $\mu = 1$; зеркала обозначались как объекты с электропроводностью σ : для оптического коэффициента отражения $\rho = 1$ коэффициент σ задавался равным 0,098 См/м, что свойственно для железа; для $\rho = 0,9$ задавалось $\sigma = 0,075$ См/м (подобно GaAs-м структурам), и так далее. Частота входного поля в расчетах была выбрана равной 30 ГГц, т. е. с $\lambda_{\text{вх}} = 1$ см. Если в ВОС обычно $\lambda_0 = 1550$ нм, то коэффициент пересчета получился равным: $K = 6452$.

Необходимо все же сделать оговорку об источнике неспецифичности HFSS для оптических расчетов в сравнении с перечисленными выше специализированными средствами. Если моделировать оптические процессы напрямую, т. е. задавать длину волны оптического диапазона, то и шаг сетки следует устанавливать достаточно малым. При этом заложенный в основу HFSS FEM, в отличие от FDTD, на мелкой сетке становится более громоздким ввиду значительного увеличения количества элементов (<http://www.cad-fem-cis.ru/products/ansys/>

[simulation/electromagnetics/hfss](#)). Этого не происходит в FDTD, а значит, при достижении той же точности модель HFSS потребует больших вычислительных мощностей и объема оперативной памяти, которых, как правило, все же не хватает исследователям. Поэтому в рассматриваемом случае следует искать компромисс между точностью решения, временем на вычисления и ресурсами, необходимыми для его реализации, исходя из физических процессов в задаче. Если же безотносительно к последним добиваться сколь угодно уменьшения шага, осознанно допуская увеличение объема вычислений, то можно столкнуться не с увеличением, а даже с уменьшением итоговой точности результатов, не говоря уже о сложности

получения стабильных решений. Так, в [24] показано, что у погрешности вычислений имеется минимум при небольшом количестве (вообще, порядка 3...4 во многих технических задачах) знаков после запятой, и с увеличением последних точность снижается.

Компьютерное моделирование проводилось следующим образом. Сначала было рассчитано поле (стоячая волна) в резонаторе – смесителе ДИФП, обладающем плоскими зеркалами (рисунок 3) с последующей выгрузкой данных в отдельный вспомогательный файл. Поле характеризуется параллельно расположенными гребнями волны, свидетельствующими о наличии конструктивной интерференции.

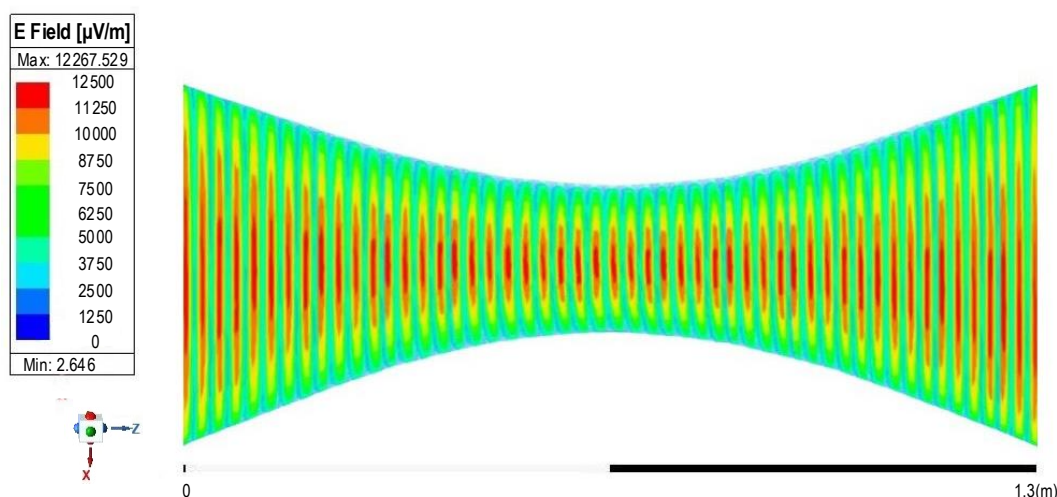


Рис. 3. Стоячая волна в смесителе ДИФП с плоскими зеркалами: показаны 1 через 8 для наглядности, коэффициент отражения зеркал $\rho = 0,85$ (пояснения см. далее)

Fig. 3. Standing Wave in a DIFP Mixer with Flat Mirrors: Characterized by Parallel Wave Crests: Shown 1 Through 8 for Clarity, Reflection Coefficient of the Mirrors $\rho = 0,85$ (See Below for Explanations)

Затем в режиме решения обратной задачи полученное поле заводилось в другой файл – с конструкцией ДИФП, содержащей гребенчатое выходное зеркало, и рассматривалось как желаемый результат, т. е. задавалось на первом шаге итерации. Все расчеты проводились только для одного (выходного) гребенчатого зеркала, другое (входное) оставалось плоским. В случае, если выставить оба зеркала гребенчатыми, то не удастся получить сходящегося решения ни при каком k . Далее в программе запускался процесс параметризации (выявление наиболее значимых параметров искомой структуры – световодной гребенки), а уже затем – процесс оптимизации по найденным параметрам. При оптимизации задавался критерий θ минимального отличия ширины получаемых гребней стоячей волны h относительно изначальной их ширины h_0 , соответствующей случаю плоских зеркал (рисунок 3), т. е. $\theta = \min|h - h_0|$. Величина h , как известно [21], определяет резкость интерфе-

ренционной картины, которую и требовалось по возможности сохранить для ДИФП со сложным зеркалом. Кроме того, при моделировании ДИФП со сложным зеркалом отслеживался порядок следования гребней стоячей волны (не допускалось их соединение или расщепление), возможен был только некоторый изгиб – в соответствии с изогнутостью зеркала.

Моделирование проводилось только в виде линейной задачи, так как ориентировочно предполагалась работа устройства в линейном режиме. Кроме того, HFSS непосредственно решает лишь линейные уравнения Максвелла, и тем самым не предназначен для моделирования нелинейных процессов.

Хотя, в случае широкого применения ДИФП-разделителя для перенаправления самых разных оптических сигналов, включая служебные, вполне могут возникать различные оптические нелиней-

ности, например, такие как SPM или XPM. Причем, если обратиться к [17], то нелинейности могут происходить как по причине повышенной мощности, так и в связи с короткой длительностью импульса, оба эти варианта принципиально возможны – если не в настоящее время, то в некоторой перспективе. Поэтому изучить влияние нелинейностей на установление интерференционной картины представляется целесообразным в дальнейших исследованиях – либо с применением специализированных пакетов, либо, в первом приближении, с уже опробованным инструментом HFSS, но с добавлением специальных решателей. Так, в частности, решатель Discontinuous Galerkin Time Domain (DGTd), построенный на методе Галеркина (<http://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/simulation/electromagnetics/hfss>) и реализующий дополнение HFSS-Transient, обеспечивает решение задач электродинамики в нестационарной постановке, с возбуждением во временной области и анализом переходных процессов. Дополненный пакет HFSS-Transient предназначен для задач импульсной локализации, анализа переходных процессов на СВЧ и High-Speed пассивных узлах [25], и даже позволяет моделировать процессы разрядов и ударов молний. Решатель Electromagnetic Interference Tool (EMIT) тоже может быть полезен в нелинейных задачах – позволяет рассчитывать радиочастотные взаимодействия через динамическую связь с основным решателем HFSS (<http://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/simulation/electromagnetics/hfss>) [25], и тем самым позволяет учитывать эффекты нелинейных компонентов системы.

Рассматривались световодные гребенки двух видов – ступенчатая и спиральная (см. рисунки 2b, 2c), в последней предполагалось размещение световодов без их ступенчатого смещения, но с полированием световодных торцов под углом $< 90^\circ$ к оси световода. Это позволяло снизить потери на рассеяние в интерференционной картине, так как фактически имело место плоское наклонное зеркало в каждой точке без ребристости структуры, что увеличивало ее резкость при аналогичных параметрах по сравнению со случаем ступенчатой гребенки, а значит – позволяло уменьшить k . Проектирование гребенки выполнялось следующим образом: сначала находилась ее общая форма (рис. 4), обеспечивающая наименьшее искажение интерференционной картины, в том числе – и при изменении длины волны в выбранном диапазоне. В процессе моделирования выполнялось также и небольшое варьирование показателя преломления вблизи данного зеркала, что позволило получить уточненное k^* по отношению к [20], также способствующее минимизации ϑ .

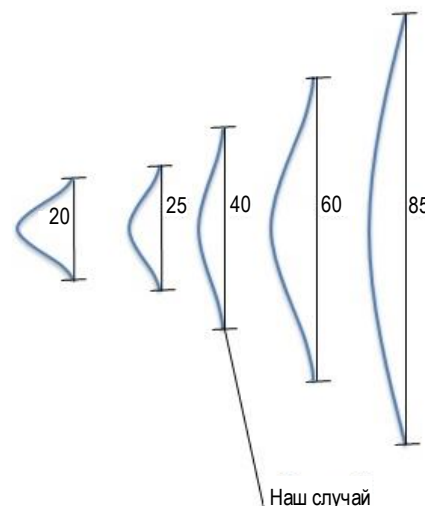


Рис. 4. Найденные формы для выпукло-изогнутого гребенчатого зеркала ДИФП для различных его диаметров
Fig. 4. Found Shapes for the Convex-Curved Comb Mirror of the DIFP for Its Various Diameters

Значимые параметры (см. рисунок 4), выявленные при параметризации в HFSS:

- 1) градиент показателя преломления вблизи зеркала;
- 2) длина и ширина выступающей узкой части («носика») по отношению к диаметру основания;
- 3) соотношение длины «носика» и общей высоты выпуклости также с учетом диаметра.

В расчетах предполагалось, что шероховатость (ребристость) зеркала отсутствует. Установлено также, что коэффициент отражения зеркал в пределах $\rho = 0,85 \dots 0,95$ (задаваемый в HFSS через σ) слабо влиял на результат.

Также было установлено, что такое зеркало должно содержать характерный перегиб: с увеличением диаметра точка перегиба удаляется от оси, а сам перегиб уменьшался вплоть до его исчезновения. Для малых диаметров, наоборот, перегиб становится более выраженным, а «носик» – более вытянутым (см. рисунок 4). При этом для различных диаметров такое изогнутое зеркало должно содержать плоский (хотя бы небольшой) «торец носика». Для пропорционального (по отношению к [20] смесителя (см. рисунок 2a), т. е. с длиной 1,3 м при расчетах в HFSS) его диаметр в области выходного торца должен составлять $\sim 38,7$ см для $\lambda_{\text{вх}} = 1$ см.

Затем для найденных – формы выпукло-изогнутого зеркала и k^* вновь выполнялось построение интерференционной картины – гребней стоячей волны (рис. 5). Был получен следующий результат: вблизи сложного зеркала гребни соответствующим образом также претерпевают изгиб, некоторое расширение (увеличивается h), усугубляющееся к основанию зеркала (т. е. для больших r) вплоть до полного их пропадания, и расщепление.

Последнее проявлялось значительнее также для больших r и становилось заметным для ρ свыше 0,9. В расчетах было принято $\lambda_1 = 1$ см, что соответствует оптической $\lambda_0 \cong 1,5499$ мкм, и $\lambda_2 = 1,01$ см, что соответствует $\lambda_0 \cong 1,5654$ мкм; $\rho = 0,85$. В примере для наглядности λ_1 существенно отличается от λ_2 , чем требуется в задаче.

Изменение длины волны несколько меняло картину: для более коротких волн эффект оказывался выраженным сильнее, чем для более длинных. Поэтому далее с целью уменьшения наблюдаемого, вновь выполнялся подбор κ (варьированием только вблизи сложного зеркала, не далее 20 лямбд от «носика», чтобы не увеличивать чрезмерно время счета). Так был получен итоговый

градиент показателя преломления κ^{**} , обеспечивающий наименьшее разрушение интерференционной картины в рассматриваемой конфигурации. Он получился, в отличие от представленного на рисунке 2d, несколько уменьшающимся к самому зеркалу. Но даже и при последующем установлении κ^{**} описанное выше влияние длины волны сохранялось. Поэтому в отношении структуры световодной гребенки был сделан следующий вывод: для выведения (выделения) сигнала на коротких волнах необходимо выполнять резонирование с гребенчатой структурой интерферометра у самого ее «носика», так как дальше к ее основанию интерференционная картина уже разрушается.

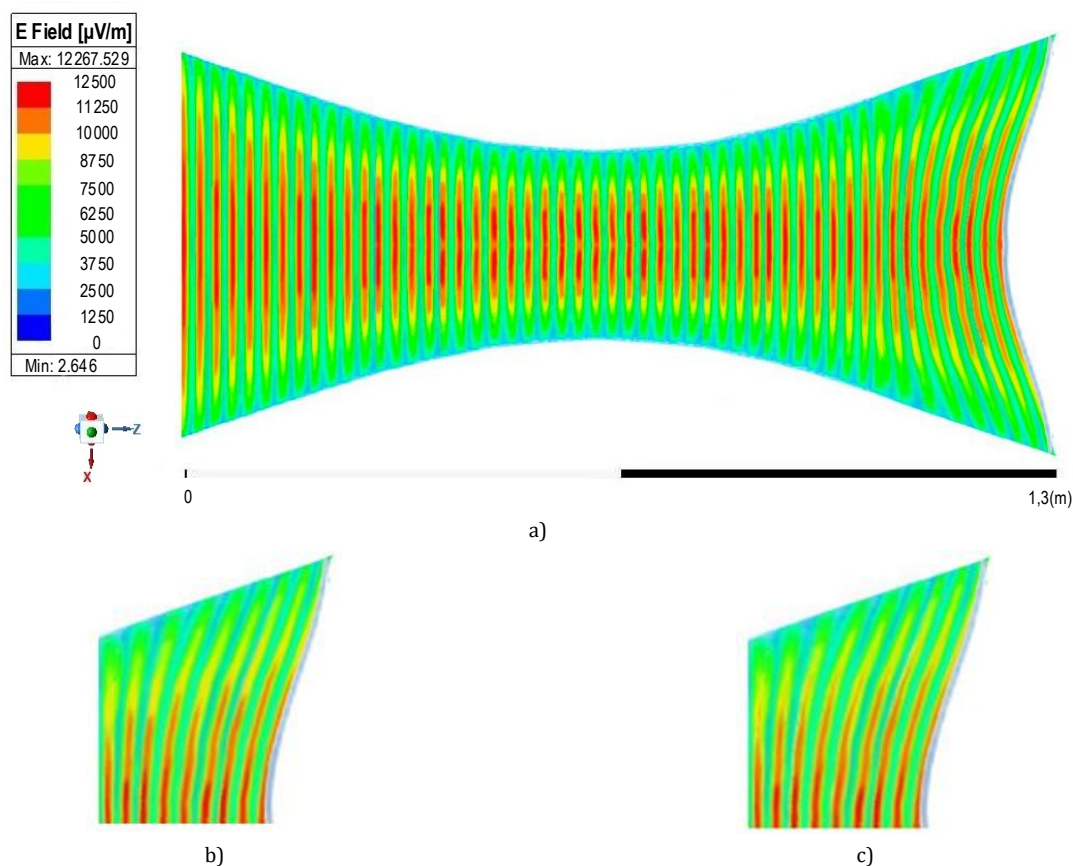


Рис. 5. Стоячая волна в смесителе ДИФП с выходным оптимизированным сложным зеркалом (а), характеризуется изогнутыми гребнями стоячей волны вблизи сложного зеркала: б) для меньших длин волн

Fig. 5. The Standing Wave in the DIFP Mixer with an Optimized Complex Mirror Output (a), is Characterized by Curved Crests of the Standing Wave Near the Complex Mirror: for Shorter (b) and Longer (c) Wavelengths

Для несколько более длинных волн интерференционная картина имеет стройный вид не только около «носика», но и немного дальше, т. е. продолжает сохраняться с ростом r . С еще большим увеличением длины волны процесс сохранения стройности интерференционной картины к основанию сложного зеркала продолжается. Откуда

ясно, что проектирование гребенки необходимо выполнять, исходя из следующего:

- выходные торцы световодов для отведения более коротких волн из ДИФП должны устанавливаться ближе к «носика» гребенки (ступенька 1 на рисунке 6; каждая ступенька содержит несколько ярусов световодных торцов, образующих концен-

трические кольца относительно оси устройства);

- выходные световоды, отводящие более длинные волны (далее от «носика» к основанию гребенки – ступенька 2);

- еще более длинные волны (еще дальше к основанию – ступенька 3);

- размещение торцов дополнительных световодов (образующих второй резонатор), обеспечивающих разделение мощностей в приведенном выше соотношении ($P_1 / P_2 \sim 2,7...2,8$), из которого пропорциональным пересчетом можно получить, что дополнительных световодов суммарно должно быть примерно в 2 раза больше, чем выходных с каждой ступеньки для $\rho = 0,85$; при изменении ρ эта пропорция, очевидно, меняется.

На рисунке 6 представлена схема объединения выходных и дополнительных световодов в гребенчатую структуру, соответствующая представленным соображениям.

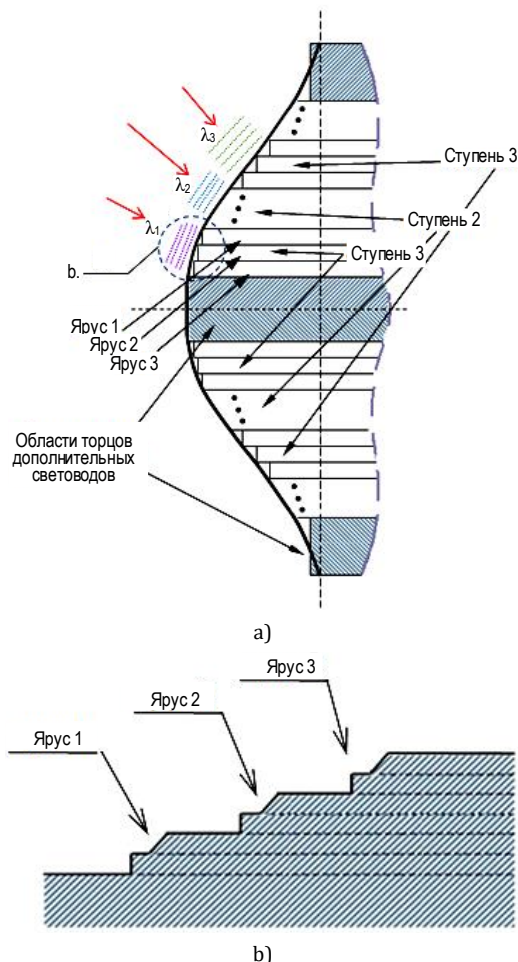


Рис. 6. Предложенный принцип построения ступенчатой световодной гребенки: а) общий вид (сбоку) и б) пример ступенчато-скошенной сборки первой ступени, состоящей из трех двухслойных ярусов световодов (световодных торцов)

Fig. 6. The Proposed Principle of Constructing a Stepped Light Guide Comb: a) General View (Side View) and b) an Example of a Stepped-Beveled Assembly of the First Stage, Consisting of Three Two-Layer Tiers of Light Guides (Light Guide Ends)

Нетрудно установить, что если собирать гребенку из 3-х многоярусных ступенек, ориентированных на определенные длины волн, то соотношение суммарного количества выходных световодов к количеству дополнительных световодов окажется в пропорции как $\sim 1,665/1$. Если с каждой ступеньки отводить по 30...50 шт. световодов, то во второй резонатор потребуется порядка 100 шт. Их предлагается размещать на самом «носике» гребенки и около ее основания, так как в данной задаче не требуется получения спектральной избирательности второго резонатора. Каждая ступенька (в случае ступенчатой структуры гребенки), как уже упоминалось выше, образована несколькими ярусами с характерным смещением d , зависящем от выводимой длины волны данной ступенькой (определяется расстоянием между гребнями стоячей волны и будет обсуждаться далее).

Каждый ярус может состоять из нескольких слоев, и ввиду того, что гребни стоячей волны являются наклонными к оси устройства в области торцов выходных световодов, то предложено полировку указанных торцов в ярусах также выполнять под углом $< 90^\circ$ к оси устройства (по аналогии со спиральным способом размещения, т. е. со скошенностью) – в соответствии с расположением стоячей волны в данной области. Скошенность торцов обеспечивает их квазипараллельность к фронтам стоячей волны. Сдвиг на первой ступеньке d_1 соответствует резонансу с λ_1 (представлен для наглядности не в масштабе). Угол скошенности зависит от расположения торца данного световода на гребенке, т. е. от удаленности его от оси устройства; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$.

Для построения устройства целесообразно использовать световоды уменьшенного диаметра (4 мкм [26]) также с уменьшенным (сточенным) диаметром оболочки. Либо вообще изделие гребенку выполнять не в виде волоконной сборки, а в виде цельнолитого изделия (например, литографическим способом [27]), а световоды приклеивать уже затем к его основанию.

Ступенчатая гребенка, по мнению авторов, лучше спиральной ввиду того, что выведение заданных длин волн выполняется установленным, предсказуемым образом. В то время как спиральная гребенка, согласно результатам моделирования, хотя и обеспечивает несколько меньшие потери, но выводит длины волн хаотично по выходным световодам. Из-за чего трудно спроектировать устройство, распределяющее заданные длины волн из chirпированного сигнала, например, на заданные элементы фазированной антенной решетки (ФАР) [18]. Кроме того, ступенчатая гребенка обеспечивает большую мощность выведенного сигнала на заданной длине волны. Поэтому

окончательно решено остановиться на ступенчато-скошенной конструкции гребенки (см. рисунок 6), взяв достоинства как спирального, так и ступенчатого вариантов построения.

Представленные результаты получены без учета потерь излучения, которые укрупненно можно разделить на две категории: потери, связанные со свойствами материалов, в основном определяющие километрическое затухание в линии, и условно потери, связанные с ненулевой постоянной составляющей интерференционной картины. В первом случае – это потери у оптических материалов, и в настоящее время они, как правило, невелики, к тому же устройство имеет все же весьма ограниченный размер. Второй случай более интересен и непосредственно связан с конструкцией. Для оценки таковых рассмотрим соотношение:

$$\xi = \left(\frac{E_c}{E_p} \right) 100 \%,$$

где E_c представляет амплитуду в минимуме (по расчетам на рисунке 5 – ~2700 мкВ/м); E_p – на вершине интерференционного пика ~12500 мкВ/м.

Следовательно, $\xi_{0,85} \cong 20...22 \%$ для $\rho = 0,85$. Однако с ростом ρ величина ξ заметно снижается: для $\rho = 0,9$ получается $\xi_{0,9} \cong 14...16 \%$; далее – $\xi_{0,95} \cong 7...8 \%$, и $\xi_{0,98} \cong 3...4 \%$. Но безусловный выбор высоких коэффициентов отражения авторы не считают целесообразным, так как чем выше ρ , тем конструкция получится дороже, и значительно скажутся погрешности и неувязки изготовления. Выбор $\rho = 0,85$ для проведения настоящих расчетов обусловлен анализом ранних исследований [19], но задача оптимизации ρ представляется значимой и является предметом отдельного исследования.

Можно сказать, что описанное здесь устройство: волоконно-оптический ДИФП с профилированным смесителем и оптимизированной многопортовой световодной гребенкой на выходном зеркале – является нереляционным переключателем оптических сигналов (чирпированных импульсов), либо – пакетов, когда функция чирпа $C_\lambda(t)$ меняется не в пределах одного импульса (например: $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 \rightarrow \lambda_3$), либо от импульса к импульсу, а в пределах их группы [18]. Если к выходам ДИФП подключены радиоизлучатели, например, многолучевой ФАР, то устройство позволяет выполнять коммутацию пакетов на различные радиолучи, которые могут обслуживать различные подсети (VLANы [18]).

Данное устройство авторы относят к классу волоконно-оптических многопортовых и одновременно – быстрых оптических переключателей ввиду того, что вариация $C_\lambda(t)$, например, в волоконно-оптическом сегменте RoF, может выполняться изменением мощности импульса в свето-

водном элементе с повышенной нелинейностью, что реализуется аналоговыми средствами за времена ~0,01 нс и даже быстрее [17]. Количество выходных портов зависит от размера смесителя и структуры выходного зеркала ДИФП, и может составлять порядка 50...100 и более. Описанный метод не требует буферизации, и это также добавляет ему привлекательности. Но в отличие от решений Ultrafast All-Optical Switching [11–15], представленная схема призвана коммутировать сигналы традиционных многофотонных ВОС, работающих по G.703.

О практическом применении полностью оптического переключателя

Описанное выше многопортовое интерференционное устройство может применяться для узко-спектрального разделения составляющих сигнала в зависимости от значения их мгновенной длины волны $\lambda_{\text{мгн}}$. Отсюда понятно, что одним из основополагающих параметров является его разрешающая способность $\theta = \lambda_0 / \delta\lambda$. Но если для классического интерферометра Фабри – Перо с порядком интерференции m величина $\theta_{\text{ИФП}}$ однозначно определяется коэффициентом отражения зеркал ρ [21]:

$$\theta_{\text{ИФП}} = \pi m \frac{\sqrt{\rho}}{(1 - \rho)}, \quad (1)$$

что находится из аналитической передаточной функции интерферометра Фабри – Перо, то для рассматриваемого ДИФП величина $\theta_{\text{ДИФП}}$ аналитически получена быть не может – ввиду отсутствия аналитической передаточной функции устройства, обладающего к тому же градиентом показателя преломления k . Поэтому проведем оценку $\theta_{\text{ДИФП}}$ по аналогии с $\theta_{\text{ИФП}}$ и исходя из параметров вычисленной в программе HFSS картины поля (см. рисунок 5).

Так, в интерферометре Фабри – Перо, согласно [21], ширина интерференционной полосы по уровню половинной интенсивности резонанса (рисунок 7), выраженная в долях разности фаз δ , имеет вид:

$$\Delta\delta = \frac{(1 - \rho)}{\sqrt{\rho}}. \quad (2)$$

Если рассматривать ширину интерференционной полосы как: $h = |z_1 - z_2|$ (см. рисунок 7), то $\Delta\delta(z) = \frac{4\pi n h}{\lambda_0}$, и после подстановки в (1) получаем минимально разрешаемую ширину линии $\delta\lambda$:

$$\delta\lambda \cong \frac{4n}{m} \cdot |z_1 - z_2|. \quad (3)$$

Учитывая, что рассматриваемый ДИФП обладает градиентом показателя преломления, то окончательно для минимально разрешаемой ширины линии можно записать:

$$\delta\lambda \cong \frac{4}{m} \cdot |n(z_1) \cdot z_1 - n(z_2) \cdot z_2|. \quad (4)$$

Если порядок интерференционной картины ДИФП m в области световодной гребенки составляет ~ 400 для коэффициента отражения зеркал 0,85 (см. рисунок 5), то с учетом найденного κ^{**} и рассчитанного значения ширины интерференционной полосы в области торцов выходных световодов, пересчитанной затем с коэффициентом K для оптического случая (составляет порядка 0,04 мкм с небольшой вариацией от r в третьем знаке, т. е. в зависимости от удаленности световодного торца от носика гребенки), получаем: $\delta\lambda_{\text{опт}} \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ нм, что можно считать достаточным для выбранного диапазона чирпирования (см. таблицу 2). Здесь следует обратить внимание на то, что в расчетах предполагалось отсутствие рельефности на зеркалах ДИФП. При наличии по-

следней $\delta\lambda_{\text{опт}}$ окажется больше. Но учитывая, что на функционирование устройства влияет не только его абсолютная разрешающая способность, а также и конструкция выходной части – световодной гребенки со ступенчатой структурой, предложено функцию чирпа использовать тоже ступенчатого вида. В частности, если $\Delta\lambda_{\text{max}} = 0,005$ нм, то для 3-ступенчатой гребенки целесообразно взять: $\Delta\lambda_1 = 0$, что означает передачу сигнала на несущей и $\lambda_1 = \lambda_0$; $\Delta\lambda_2 = 0,0025$ нм и $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda_2$; и $\Delta\lambda_3 = 0,005$ нм и $\lambda_3 = \lambda_0 + \Delta\lambda_3$. Как видно из (4), устройство вполне позволит выполнить разрешение указанных длин волн. В отношении самой гребенки, т. е. смещения световодных ярусов: d_1 для первой ступеньки (см. рисунок 6), соответственно: d_2 и d_3 для второй и третьей ступенек, их следует рассчитывать исходя из условия попадания максимумов стоячей волны на соответствующие ярусы (см. рисунок 7).

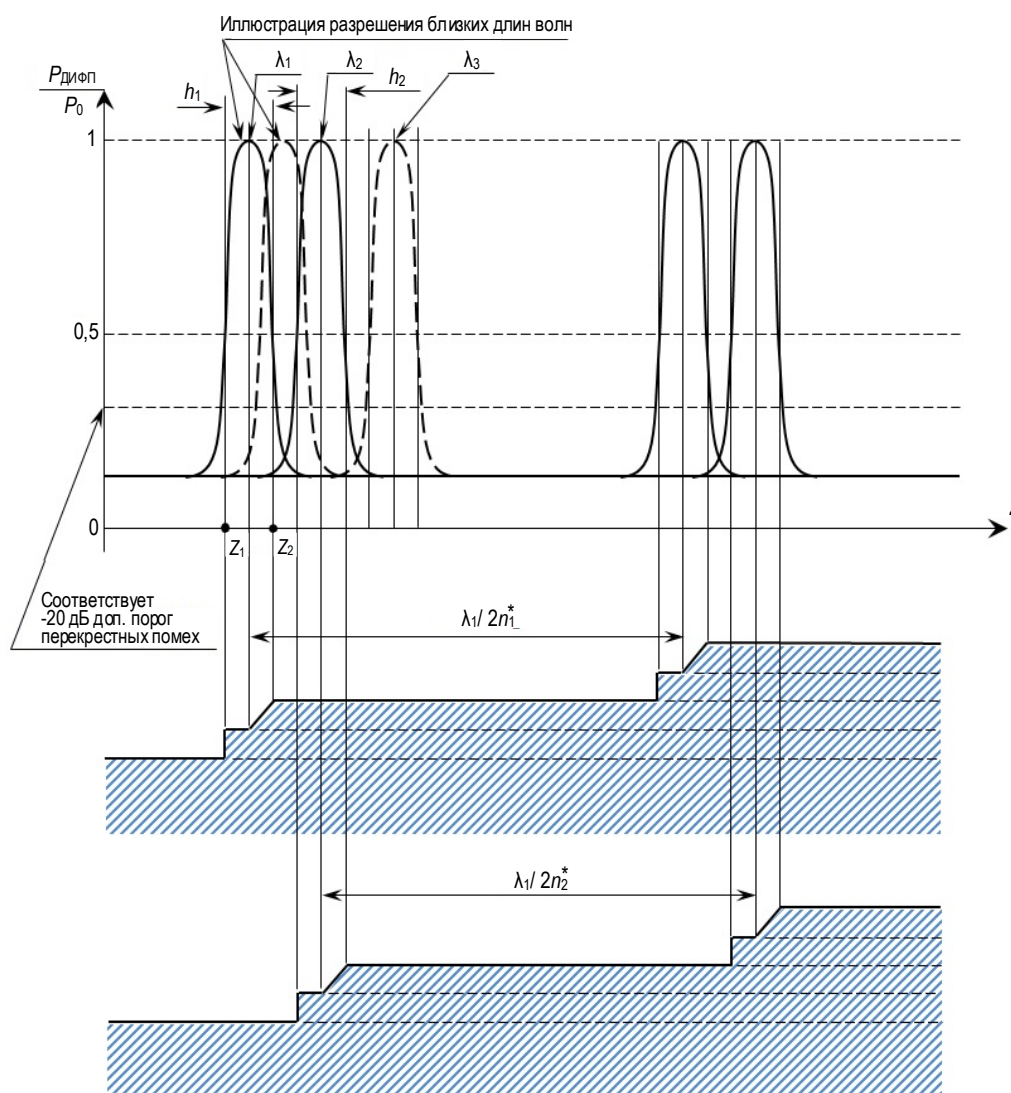


Рис. 7. Принцип выделения устройством интерференционных максимумов на длинах волн λ_1 и λ_2 различными ступеньками световодной гребенки (с шагом между ярусами $\lambda_1/2n_1^*$ и $\lambda_2/2n_2^*$, соответственно)

Fig. 7. The Principle of Selection by the Device of Interference Maxima at Wavelengths λ_1 and λ_2 by Different Steps of the Light Guide Comb (with a Step between the Tiers $\lambda_1/2n_1^*$ and $\lambda_2/2n_2^*$)

На рисунке 7 величины h_1 и h_2 определяют ширину интерференционных максимумов по [21]); n_1^* и n_2^* – значения показателей преломления в области торцов данных ярусов. Согласно [19], резонансный спектр ДИФП отличается от аналогичного для интерферометра Фабри – Перо более крутым спаданием максимумов при той же ширине интерференционной полосы. Кроме того, ДИФП свойственна слабая зависимость контрастности с ростом ρ для $\rho \geq 0,85$, приводящая последнюю фактически к наклонно-асимптотическому виду в отличие от интерферометра Фабри – Перо, для которого контрастность продолжает увеличиваться вплоть до предела $\rho = 1$, что, по-видимому, связано с наличием второго не высокочастотного резонатора. При выборе конкретных значений λ_1 и λ_2 (в таблице 2 приведены оценочные величины), следует учитывать нормы на перекрестные помехи (Cross-talk) в ВОС в соответствии с G.709, G.984.2, согласно которым при изменении от значений λ_1 к λ_2 интерференционные максимумы должны перекрываться менее, чем на –20 дБ.

Из-за того, что световодные ярусы имеют ненулевую толщину из-за сточенности (скошенности, см. рисунок 6), особо узкой интерференционной линии добиваться и не следует. Более важным является точность установки ярусов с учетом незначительного отличия λ_1 , λ_2 и λ_3 . Но задача выполнения световодной сборки с допустимой абсолютной субнанометровой погрешностью успешно решена в [28], где описана лабораторная (малосерийная) методика изготовления подобных компонентов Российской научной группой. Можно также воспользоваться и методикой [27], выполняя гребенку в виде единого дополнительного изделия. Для снижения сложности изготовления конструкции устройства в последствии следует ориентироваться не на традиционные технологии сборки, ставшие уже классическими для волоконно-оптических изделий, а, скорее всего, привлекать нанометровые техпроцессы, которые самым активным образом развиваются сегодня как в электронике [29], так и в оптике (<https://www.photonics.com/Articles/Nano-Optics Technology Optical Alchemy/a25513>), и уже выходят на уровень серийных производств. Одним из сложных элементов ДИФП, несомненно, является градиентный смеситель, который авторы, как один из возможных вариантов, предлагают выполнять из наноструктурного ситаллового стекла [22]. Но необходимо заметить, что такой подход вряд ли может подойти для серийных изделий, так как весьма непростой задачей является выбор подходящей области заготовки – с требуемыми размерами и градиентом n . В работе [22] авторы стремились экспериментально изучить возможность получения подобных градиентов оптически прозрачных тел, исходя из до-

ступных технических средств и материалов. Существуют и иные подходы к решению данной задачи – например, с привлечением технологии квантовых точек. Последние, как показано в [30], определяют макроскопическую диэлектрическую проницаемость ϵ , а с ней – и значение n , и, кроме того, обеспечивают плановость свойств, что допускает применение метода для серийного производства. Причем указанное может реализовываться на аморфном материале, обладающем, как правило, меньшими погонными потерями в сравнении с кристаллитным ситаллом. Другие оптические свойства, такие как километрическое затухание и линейная составляющая усредненного показателя преломления (n_0) вблизи телекоммуникационных длин волн, следует подбирать (проектировать) близкими к параметрам оптического волокна (ОВ) (например, по G.652, как наиболее распространенного в эксплуатации на сегодня в России).

Здесь еще раз обратим внимание, что результаты расчета поля в смесителе ДИФП, заложенные в основу последующих количественных оценок, получены с применением неспециализированного программного пакета, который, кстати, не позволяет напрямую задавать оптические параметры – их приходится вычислять через СВЧ-характеристики. Последний был выбран ввиду значительного разнообразия функциональных средств, необходимых для моделирования в рассматриваемой задаче. Поэтому полученные результаты правильнее было бы считать лишь приближенными, а в случае необходимости их уточнения – структуры поля вблизи выходного торца смесителя и подобных, что значительно влияет на последующее конструирование компонентов (целесообразность и расчет углов скошенности световодных торцов на ярусах гребенки, количество и структуру ярусов, и прочее) следует проводить с более подходящим программным средством, что можно считать направлением дальнейших исследований. Скорее всего это позволит определиться и с наибольшим возможным количеством ступенек гребенки (по оценке их может быть не более 10 шт.), сделать анализ влияния рельефной структуры зеркала, а значит – и определить потенциальные возможности устройства.

Далее для того, чтобы понять, на каких характеристических сегментах ВОС может применяться рассматриваемый метод быстрой коммутации с chirпированным сигналом, выполнена оценка влияния на него хроматической дисперсии (ХД) со стороны световодов, составляющих основу современных Российских линий – SMF-28 (т. е. соответствующих G.652). Их параметры: коэффициент фазы по [17] $\beta_{2,SMF} \approx -21,7$ пс²/м и, соответственно, дисперсионный коэффициент в области длин волн маги-

стральной передачи $\lambda_0 \cong 1550$ нм соответствует выражению:

$$D_{\text{ХД, SMF-28}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2 \cong 17 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}.$$

В таблице 3 приведены вычисленные значения дисперсионной длины [17] L_D для разных начальных длительностей информационного импульса T_0 , соответствующих актуальным битовым скоростям B , а также временная зависимость величины смещения частоты несущей (частотного чирпа) $C_{\omega}^{(\text{ХД})}$ и значения наибольшего смещения длины волны – волнового чирпа $C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$, приобретаемые под действием ХД. При проведении расчетов ис-

пользовалось соотношение между C_{λ} и C_{ω} : $C_{\lambda} = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \cdot C_{\omega}$. Согласно данным таблицы 3, для чирп-управления компонентами ВОС, предполагающего удаленную передачу заданного чирп-сигнала, следует использовать невысокие (средние) битовые скорости (до 1 Гбит/с), характерные для многих протоколов xPON, а также низких скоростей иерархии SDH, что свойственно для большинства сетей городского масштаба. В этом случае в пределах характерных длин сегментов городских сетей (до 100 км) воздействие ХД на управляющий чирп не окажет решающего влияния. На более высоких скоростях целесообразно работать на коротких сегментах, например, в сетях ЦОДов.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение приобретаемого из-за ХД и рабочего значений чирпа

TABLE 3. Comparison of Acquired due to CD and Operating Chirp Values

B , Гбит/с (предполагается, что $B \approx 1/T_0$)	T_0		L_D , км	Приобретаемые значения $C_{\omega, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ и $C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ на L_D под действием ХД для световода типа SMF-28		Наибольшее значение рабочего чирпа: $C_{\lambda, \text{max}} = 5 \cdot 10^{-3}$ [нм]; разрешение по длине волны ДИФП: $\delta\lambda \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ [нм]
	сек	пс		$C_{\omega, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ [рад/с]	$C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ [нм] на длительности импульса	
0,5	$2 \cdot 10^{-9}$	2000	184,3	$0,13 \cdot 10^{18}$ $T_0 = 0,26 \cdot 10^9$	$0,165 \cdot 10^{-3}$	действие ХД можно не учитывать
1	10^{-9}	1000	46,01	$0,5 \cdot 10^{18}$ $T_0 = 0,5 \cdot 10^9$	$0,635 \cdot 10^{-3}$	в первом приближении действием ХД пренебрегаем
10	10^{-10}	100	0,4608	$0,5 \cdot 10^{20}$ $T_0 = 5 \cdot 10^9$	$6,35 \cdot 10^{-3}$	нужен компенсатор ХД / чирпа из-за ХД на городских сегментах
40	$0,25 \cdot 10^{-10}$	25	0,0288	$0,8 \cdot 10^{21}$ $T_0 = 20 \cdot 10^9$	$25,4 \cdot 10^{-3}$	возможна работа на коротких сегментах, например в ЦОД

Следует также учитывать, что воздействие ХД ведет к линейному смещению чирпирования, что вполне может быть учтено при формировании сигнала, и в ряде задач позволит увеличить протяженность сегмента.

С точки зрения актуального приложения ДИФП-коммутатора для телекоммуникаций можно сказать следующее. Разработанное устройство позволяет реализовывать λ -коммутацию оптических сигналов / пакетов (без буферизации), в отличие от традиционной λ -коммутации потоков (каналов) в xWDM. Причем действие может производиться как для внутрисполосного излучения (внутри λ -канала xWDM по G.694, так называемый принцип дробного лямбда-переключения ($F_{\lambda}S$, аббр. от англ. Fractional Lambda Switching [31–33]), так и для узких спектральных каналов. Последнее соответствует недавней редакции рекомендации G.694.1, опубликованной в октябре 2020 г., где допускается снижение $\Delta\lambda$ до значения 0,01 нм на короткосегментных оптических сетях. Таковые обусловлены масштабным внедрением оптической передачи в системы ЦОД, а также во внутреннюю архитектуру высокоскоростных аппаратных средств (optical backplane [34]), появлением технологии виртуаль-

ных подсетей VMware NSX, Nutanix Xtreme Computing Platform в рамках SDN, когда заданные лямбды переносят выделенные сервисы [35], и подобное. Причем в этих перечисленных случаях система передачи с коммутацией пакетов выглядит существенно более привлекательной по отношению к системе с коммутацией каналов. Но ввиду отсутствия в коммерческом доступе многопортовых волоконно-оптических высокоскоростных узкоспектральных переключателей, предназначенных для работы с традиционными телекоммуникационными сигналами (по G.703), указанные задачи либо не доведены до оптического решения, либо, как отмечается в [36–38], пакетно-коммутирующая сеть фактически введена в режим коммутации каналов, что негативно сказывается на ее итоговой производительности. Согласно теории массового обслуживания, в режиме коммутации каналов при молчании абонентов время от времени система не использует эту часть свободного канального ресурса (рисунок 8), т. е. можно сказать, что высокопроизводительному абоненту не предоставляется этого не занятого ресурса. Такой абонент работает с выделенной ему полосой пропускания, и не более того, а значит – он ждет

своих сообщений дольше, чем потенциально могла бы обеспечить для него система передачи.

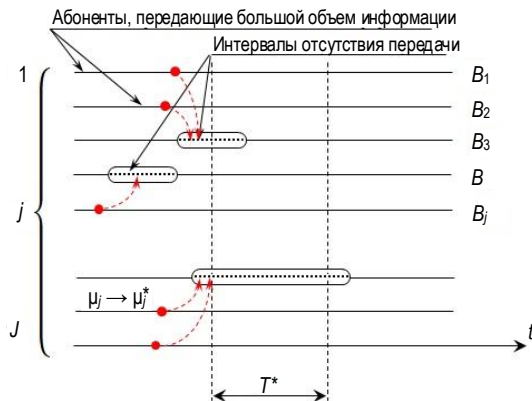


Рис. 8. Иллюстрация принципа функционирования системы с коммутацией каналов, в которой возможно заполнение периодов молчания абонентов

Fig. 8. Illustration of a Circuit-Switched System Operating Principle in Which it is Possible to Fill the Periods of Subscriber Silence

Для количественной сравнительной оценки параметров такой многоканальной системы с коммутацией каналов определим потенциальную пропускную способность (см. рисунок 8), как сумму: $\Psi = \sum_{j=1}^J B_j$, где B_j – установленные битовые скорости в каналах (вполне возможно: $B_1 = B_2 = \dots = B_j, \dots, = B_j$; всего J каналов, тогда $\Psi = J \cdot B_j$). Но, согласно сказанному выше, с учетом возможного молчания абонентов реальное количество передаваемой информации (реальная производительность системы связи), обозначим через Θ , без возможности задействования таких периодов неизбежно окажется меньше: $\Theta < \Psi$. На рисунке пунктирными линиями (обведены овалами) обозначены периоды молчания малопродуктивных абонентов, которые вполне могут быть использованы для передачи сообщений от высокопроизводительных абонентов (красные пунктирные стрелки символизируют переброс трафика); T^* – произвольный период наблюдения. Следует заметить, что в большинстве случаев для систем с коммутацией каналов поток обслуживания принимается простейшим, μ_j являются неизменными – как от канала к каналу ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j, \dots, = \mu_j$), так и во времени.

Предположим также, что режим работы системы характеризуется стационарным Пуассоновским процессом с соответствующими интенсивностями η_j и μ_j – поступления и обслуживания заявок абонентов, соответственно ($\mu_j = 1/t_j^{(обсл.)}$). Следует отметить, что при необходимости более детального учета свойств трафика без потери общности можно заменить Пуассоновское распределение на распределение Эрланга и т. д. [39].

Тогда с учетом молчания абонентов на L линиях из общего количества J в предположении об экс-

поненциальном распределении длительностей промежутков молчания, можно записать:

$$\Theta(t) = \sum_{j=1}^J j \cdot B_j (1 - A_j e^{-\mu_j t}) \cdot e^{-\eta_j t} - \sum_{j=1}^{L, L < J} B_j (1 - M_j e^{-s_j t}), \quad (5)$$

где s_j – интенсивности потоков, характеризующие периоды молчания; A_j – нормированные коэффициенты работоспособности, определяющие возможное перенаправление трафика с других линий; M_j – нормированные коэффициенты молчания, связанные с техническими причинами, для которых по аналогии с [40] можно положить:

$$A_j = \prod_{i=1, i \neq j}^J \left(\frac{\frac{\mu_i - g_i}{\gamma_i}}{\frac{\mu_j - g_j}{\gamma_j} - \frac{\mu_i - g_i}{\gamma_i}} \right) \times \left(\sum_{i=1}^J \frac{\mu_i - g_i}{\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$M_j = \prod_{i=1, i \neq j}^{L, L < J} \left(\frac{\gamma_i (s_i + g_i)}{\gamma_i (s_i + g_i) + \gamma_j (s_j + g_j)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^{L, L < J} \frac{s_i + g_i}{\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где γ – степени загруженности оборудования или нагрузка (зависит от отношения η и μ); g – определяет среднюю интенсивность интервалов молчания абонентов (индексы опущены для краткости); для функционирующей системы передачи выполняются условия: $0 \leq A_j \leq 1$ и $0 \leq M_j \leq 1$.

Итак, если предоставлять высокопроизводительным абонентам дополнительную полосу пропускания в периоды молчания в параллельных каналах, как было предложено выше, то соответствующие интенсивности обслуживания заявок μ_j , $j = 1 \dots (J - L)$, $L < J$, увеличатся до значений:

$$\mu_j^*, \mu_j^* > \mu_j.$$

Тогда для реальной производительности системы связи можно записать:

$$\Theta^*(t) = \sum_{j=1}^J j \cdot B_j (1 - A_j e^{-\mu_j^* t}) \cdot e^{-\eta_j t}, \quad (8)$$

где A_j соответствуют (6) ввиду не влияния в первом приближении переброски трафика на работоспособность линий.

Также в первом приближении определим:

$$\mu_j^* \cong \mu_j \cdot \left(1 + \left\langle \frac{\mu_j - s_j}{\gamma_j} \cdot e^{s_j t} \right\rangle_{t, t \leq T^*} \right), \quad (9)$$

где $\langle \bullet \rangle$ – функция усреднения величины по времени на протяжении интервала наблюдения T^* .

Тогда результирующую эффективность от применения предложенного способа управления трафиком можно записать в следующем виде:

$$Y = \frac{\Theta^*}{\Theta}. \quad (10)$$

На рисунке 9 представлены графики, полученные в результате компьютерного моделирования для параметра Y в сети с ДИФП-коммутатором, выполняющим частичную переброску трафика с обслуживающих высокопроизводительных абонентов линий (каналов) в периоды молчания менее производительных абонентов.

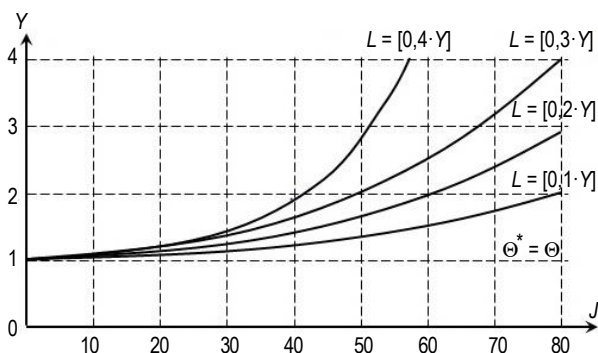


Рис. 9. Графики для результирующей эффективности в сети с ДИФП-коммутатором, заполняющим периоды молчания абонентов

Fig. 9. Graphs for the Resulting Efficiency in a Network with a DIFP Switch Filling the Periods of Subscriber Silence

Считаем, что процесс появления эпизодов молчания является стационарным, поэтому выбор T^* не влияет на характер представленных зависимостей, а только на их относительный масштаб. Значения η_j , μ_j , S_j , g_j и γ_j для выполнения моделирования были взяты, исходя из примера типового телекоммуникационного ЦОД-сегмента [41], и составляли: $\mu = 0,0033$ сеанс/с (примем, что средняя длительность сеанса связи – 5 минут, и одинаковая для всех линий), а остальные величины рассматривались как случайные и распределенные по Гауссовскому закону с математическими ожиданиями $\eta_{(MO)} = 0,146$ сеанс/с, $S_{(MO)} = 0,088$ сеанс/с, $g_{(MO)} = 0,01$ сеанс/с, и дисперсиями $\eta_{(D)} = 0,0625$ (сеанс/с)², $S_{(D)} = 0,01$ (сеанс/с)², $g_{(D)} = 0,01$ (сеанс/с)², $\gamma = \eta/\mu$. Количество каналов J было принято, исходя из параметров распространенной в настоящее время аппаратуры DWDM [42] и составило $J = 88$. Битовые скорости во всех каналах были равными 40 Гбит/с.

Таким образом, с применением разработанного устройства увеличивается пропускная эффективная способность сети, что влияет на один из наиболее существенных QoS-показателей – способствует уменьшению времени ожидания сообщения абонентами.

Выводы

Резюмируя выполненное исследование, можно сказать следующее. Анализ известных волоконно-оптических коммутационных устройств показал, что имеет место определенный пробел в отношении коммутаторов оптических сигналов / пакетов, предназначенных для применения в традиционных ВОС (работающих с сигналами по G.703). Применение же коммерчески доступных моделей, ориентированных на xWDM (по G.694) для построения оптических пакетных сетей не представляется коммерчески обоснованным ввиду получающейся низкой загрузки λ -канала в таком режиме. Поэтому реальное практическое применение OBS характеризуется существенно меньшим масштабом в сравнении с востребованностью данной технологии в настоящее время. Именно в рамках этого обстоятельства прорабатывается вопрос об использовании внутриполосной маркировки радиочастотного канала [2] (в RoF, по сути – в оптическом домене), обеспечивающий параллельную обработку битов с такой λ -меткой, и как следствие – низкую задержку наряду с минимальным задействованием телекоммуникационных ресурсов при управлении «на оптическом уровне» [2], а также создание технологии дробного лямбда-переключения ($F_\lambda S$) [31–33]. Очевидно, что все это может успешно функционировать при наличии узкоспектральных разделителей, конструктивно основанных на применении высокоизбирательных средств, один из вариантов которых и представлен в настоящей статье.

В основу разрабатываемого многопортового волоконно-оптического переключателя / разделителя положен ДИФП с профилированным градиентным смесителем и гребенчатой структурой выходного зеркала. Последняя обеспечивает выделение (перенаправление) сигнальной компоненты с заданной λ -меткой из общего потока в определенный волоконно-оптический сегмент. В статье предложена конструкция указанной гребенки и выполнена количественная оценка ее основных параметров, исходя из компьютерного результата моделирования электрической составляющей поля (интерференционной картины) в смесителе. Сделано предположение, что гребенка может быть выполнена не только в виде световодной сборки, но и как отдельный элемент с последующим встраиванием в световодную структуру.

Устройство является однопролетным и многопортовым, с разрешающей способностью выше, чем у дисперсионных аналогов (работа которых основана на применении призмоподобных структур), и вполне подходит для сетей с $F_\lambda S$. Быстрое оптическое переключение может быть реализовано, например, с применением chirпированного сигнала, изменение параметров которого может

достигаться в оптическом домене также полностью оптическим способом. Кроме того, градиентный характер показателя преломления может быть дополнен дисперсионными свойствами материала смесителя, что позволит усилить различие в формировании интерференционных максимумов на разных длинах волн.

В статье выполнена оценка такого сетевого параметра, как производительность при передаче

трафика на сегменте с ДИФП-коммутатором. Улучшение достигается благодаря пакетной коммутации при разгрузке трафика в xWDM, активно применяющихся сегодня в сетях ЦОДов. Следовательно, разработанное устройство может найти самые разные приложения – для поддержки OBS в оптических и оптико-радиоэфирных мультисервисных сетях.

Список источников

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 304 с.
2. Sahinel D., Rommel S., Monroy I.T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 221. DOI:10.3390/app12010221. EDN:IAHVJF
3. Shafi M., Jha R.K., Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 57548–57573. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3385230. EDN:ICZPDX
4. Xue X., Zhang S., Guo B., Ji W., Yin R., Chen B., et al. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges // arXiv:2302.05298. DOI:10.48550/arXiv.2302.05298
5. Zhao C., Cai Y., Liu A., Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2020. Vol. 19. Iss. 4. PP. 2382–2396. DOI:10.1109/twc.2020.2964543. EDN:QXLJHM
6. Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN // Труды учебных заведений связи. 2024;10(1):73–84. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
7. Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial] // Journal of Optical Communications and Networking. 2023. Vol. 16. Iss. 1. PP. A1–A23. DOI:10.1364/JOCN.495006
8. Miao W., Luo J., Di Lucente S., Dorren H., Calabretta N. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system // Optics Express. 2024. Vol. 22. Iss. 3. PP. 2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465
9. Mukherjee B. Optical Communication Networks. McGraw-Hill, 2005. 576 p.
10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review // Journal of Optics. 2018. Vol. 47. PP. 307–317. DOI:10.1007/s12596-018-0452-3. EDN:OHBQOC
11. Zhao Y., Qian C., Qiu K., Gao Y., Xu X. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides // Optics express. 2015. Vol. 23. Iss. 7. PP. 9211–9220. DOI:10.1364/OE.23.009211. EDN:UVOCHP
12. Chai Z., Hu X., Wang F., Niu X., Xie J., Gong Q. Ultrafast All-Optical Switching // Advanced Optical Materials. 2017. Vol. 5. Iss. 7. P. 1600665. DOI:10.1002/adom.201600665. EDN:YWBFFYN
13. Ono M., Hata M., Tsunekawa M., Nozaki K., Sumikura H., Chiba H., et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. Iss. 1. PP. 37–43. DOI:10.1038/s41566-019-0547-7. EDN:OYKIDV
14. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. Iss. 1. PP. 4–6. DOI:10.1038/s41566-019-0571-7. EDN:DURANK
15. Rehman A.U., Khan Y., Irfan M., Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. A Novel Design of Optical Switch Based on Guided Mode Resonances in Dielectric Photonic Crystal Structures // Photonics. 2022. Vol. 9. Iss. 8. P. 580. DOI:10.3390/photonics9080580. EDN:UJDEOL
16. Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Мешков И.К., Андрианова А.В., Абдрахманова Г.И., Ишмияров А.А. и др. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчёта его параметров // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 728–737. DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737. EDN:VCCHWZ
17. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2009. 466 p.
18. Vinogradova I.L., Golovina E.U., Gizatulin A.R., Meshkov I.K., Filatov P.E., Komissarov A.M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses // Proceedings of the Conference on Optical Technologies for Telecommunications (Kazan, Russian Federation, 22–24 November 2023). 2023. Vol. 13168. PP. 51–62. DOI:10.1117/12.3026194
19. Виноградова И.Л. Характеристики двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо // Радиотехника. 2002. № 6. С. 33–39.
20. Абдрахманова Г.И., Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Грахова Е.П., Зайнуллин А.Р., Ишмияров А.А., и др. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов. Патент на полезную модель № RU 163995 U1, от 08.02.2016. Оpubл. 20.08.2016. EDN:RKEEJZ
21. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
22. Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Абдрахманова Г.И., Грахова Е.П. и др. Подход к получению 3D-наноструктурного двухфазного ситаллового стекла, основанный на интенсивном кручении под высоким давлением // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 489–500. DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500. EDN:WMIKAN
23. Карпенко Г.Д., Клименко А.И. Способ динамической компенсации дрейфа постоянной составляющей низкочастотного синусоидального сигнала. Патент SU 482686 A1, от 16.04.1973. Оpubл. 30.08.1975. EDN:OVVZIS

24. Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Поречный С.С. Об одном подходе к практической оценке погрешностей численных результатов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 3. С. 105–110. EDN:KXXBVL
25. Евграфов А. ANSYS HFSS: передовые технологии трехмерного решения электродинамических задач // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 6(138). С. 162–167. EDN:SQWBDT
26. Kudinova M., Bouwmans G., Vanvincq O., Habert R., Plus S., Bernard R., et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses // APL Photonics. 2021. Vol. 6. Iss. 2. DOI:10.1063/5.0028195. EDN:UAKRHQ
27. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Butt M.A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review // Micromachines. 2024. Vol. 15. Iss. 11. P. 1321. DOI:10.3390/mi15111321. EDN:OMVMDO
28. Chesnokova M., Nurmukhametov D., Ponomarev R., Agliullin T., Kuznetsov A., Sakhabutdinov A., et al. Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer // Photonics. 2024. Vol. 11. Iss. 8. P. 712. DOI:10.3390/photonics11080712. EDN:NHSVWJ
29. Zhang D., Li Y. A RISC-V 32-bit microprocessor on two-dimensional semiconductor platform // Journal of Semiconductors. 2025. Vol. 46. Iss. 8. DOI:10.1088/1674-4926/25050016
30. Saha S., Pal S., Ganguly J., Ghosh M., et al. Exploring optical refractive index change of impurity doped quantum dots driven by white noise // Superlattices and Microstructures. 2015. Vol. 88. PP. 620–633. DOI:10.1016/j.spmi.2015.10.021
31. Baldi M., Ofek Y. Realizing Dynamic Optical Networking. URL: chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcglclefindmkaj/https://staff.polito.it/mario.baldi/publications/ONM2003.pdf (дата обращения 08.10.2025)
32. Agrawal D., Baldi M., Corra M., Fontana G., Marchetto G., Nguyen V.T. A Scalable Approach for Supporting Streaming Media: Design, Implementation and Experiments // Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (Santiago, Portugal, 01–04 July 2007). IEEE, 2007. PP. 211–217. DOI:10.1109/ISCC.2007.4381589
33. Baldi M., Ofek Y. Fractional Lambda Switching Principles of Operation and Performance Issues // Simulation. 2004. Vol. 80. Iss. 10. PP. 527–544. DOI:10.1177/003754970404046
34. Follett D.R., Sobin D.L. Optical backplane. Patent USA, no. 4870637A, 24.12.1987. <https://patents.google.com/patent/US4870637A/en>
35. Jorepalli S. Transforming Network Architectures with VMware NSX-T Data Centre: A Deep Dive into Software-Defined Networking for Multi-Cloud Environments // Applied Science and Engineering Journal for Advanced Research. 2025. Vol. 4. Iss. 1. PP. 7–12. DOI:10.5281/zenodo.14784450
36. Xue X., Calabretta N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks // Nature Communications. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 2257. DOI:10.1038/s41467-022-29913-1. EDN:DVCWFP
37. Singh O., Paulus R. A critical review of optical switches // Journal of Optical Communications. 2023. Vol. 44. Iss. 1. PP. 349–358. DOI:10.1515/joc-2020-0284
38. Lei Y., Li J., Liu Z., Joshi R., Xia Y. Nanosecond Precision Time Synchronization for Optical Data Center Networks // arXiv:2410.17012. 2024.
39. Еременко В.Т., Фисун А.П., Саитов И.А., Миронов А.Е., Орешин А.Н., Королев А.В. Методы и модели теории телекома. Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2019. 244 с.
40. Бачев А.Г., Вакуленко Н.Н., Захаров М.К. Математическая модель сети обмена данными с коммутацией пакетов // Программные продукты и системы. 2010. № 1. С. 158–161. EDN:MKNMVL
41. Huang S., Wang M., Liu Y., Liu Z., Cui Y. Iphicles: Tuning Parameters of Data Center Networks with Differentiable Performance Model // Proceedings of the 32nd International Symposium on Quality of Service (IWQoS, Guangzhou, China, 19–21 June 2024). IEEE, 2024. PP. 1–10. DOI:10.1109/IWQoS61813.2024.10682926
42. Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. М.: Техносфера. 2021. 420 с.

References

- Goldstein A.B., Goldstein B.S. *MPLS Technology and Protocols*. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ.; 2005. 304 p. (in Russ.)
- Sahinel D., Rommel S., Monroy I.T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(1):221. DOI:10.3390/app12010221. EDN:IAHVFI
- Shafi M., Jha R.K., Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks. *IEEE Access*. 2024;12:57548–57573. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3385230. EDN:ICZPDX
- Xue X., Zhang S., Guo B., Ji W., Yin R., Chen B., et al. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges. *arXiv:2302.05298*. DOI:10.48550/arXiv.2302.05298
- Zhao C., Cai Y., Liu A., Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(4):2382–2396. DOI:10.1109/twc.2020.2964543. EDN:QXLJHM
- Roslyakov A., Gerasimov V. Analysis of End-to-End Delay in the Transport Segment of Fronthaul 4G/5G Networks Based on TSN Technology. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(1):73–84. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
- Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2023;16(1):A1–A23. DOI:10.1364/JOCN.495006
- Miao W., Luo J., Di Lucente S., Dorren H., Calabretta N. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system. *Optics Express*. 2024;22(3):2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465
- Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. McGraw-Hill; 2005. 576 p.

10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review. *Journal of Optics*. 2018;47:307–317. DOI:10.1007/s12596-018-0452-3. EDN:OHBQOC
11. Zhao Y., Qian C., Qiu K., Gao Y., Xu X. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides. *Optics express*. 2015;23(7):9211–9220. DOI:10.1364/OE.23.009211. EDN:UVOCHP
12. Chai Z., Hu X., Wang F., Niu X., Xie J., Gong Q. Ultrafast All-Optical Switching. *Advanced Optical Materials*. 2017;5(7):1600665. DOI:10.1002/adom.201600665. EDN:YWBFFN
13. Ono M., Hata M., Tsunekawa M., Nozaki K., Sumikura H., Chiba H., et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides. *Nature Photonics*. 2020;14(1):37–43. DOI:10.1038/s41566-019-0547-7. EDN:OYKIDV
14. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching. *Nature Photonics*. 2020;14(1):4–6. EDN:DURANK
15. Rehman A.U., Khan Y., Irfan M., Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. A Novel Design of Optical Switch Based on Guided Mode Resonances in Dielectric Photonic Crystal Structures. *Photonics*. 2022;9(8):580. DOI:10.3390/photonics9080580. EDN:UJDEOL
16. Sultanov A.Kh., Vinogradova I.L., Meshkov I.K., Andrianova A.V., Abdrakhmanova G.I., Ishmiyarov A.A., et al. A method for connecting antenna radiators to rof systems using an optical device and calculating its parameters. *Computer Optics*. 2015;39(5):728–737. (in Russ.) DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737. EDN:VCCHWZ
17. Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press; 2009. 466 p.
18. Vinogradova I.L., Golovina E.U., Gizatulin A.R., Meshkov I.K., Filatov P.E., Komissarov A.M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses. *Proceedings of the Conference on Optical Technologies for Telecommunications, 22–24 November 2023, Kazan, Russian Federation, vol.13168*. 2023. p.51–62. DOI:10.1117/12.3026194
19. Vinogradova I.L. Characteristics of a two-resonator Fabry-Perot interferometer. *Radio Engineering*. 2002;6:33–39. (in Russ.)
20. Abdrakhmanova G.I., Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Grakhova E.P., Zainullin A.R., Ishmiyarov A.A., et al. *Device for branching and chirping optical signals*. Patent RF, no. 163995 U1, 02.08.2016. (in Russ.) EDN:RKEEJZ
21. Skokov I.V. *Multibeam interferometers in measuring technology*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1989. 256 p. (in Russ.)
22. Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Sultanov A.K., Meshkov I.K., Abdrakhmanova G.I., Grakhova E.P. Approach to obtaining 3D-nanostructured two-phase siall glass based on intense torsion under high pressure. *Computer Optics*. 2016;40(4):489–500. (in Russ.) DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500. EDN:WMIKAH
23. Karpenko G.D., Klimenko A.I. *Method of dynamic compensation of drift of constant component of low-frequency sinusoidal*. Patent SU, no. 482686 A1, 16.04.1973. (in Russ.) EDN:OVVZIS
24. Zhitnikov V.P., Sherykhalina N.M., Porechny S.S. On one approach to practical evaluation of errors of numerical results. *Computing, Telecommunication and Control*. 2009;3:105–110. (in Russ.) EDN:KXXBVL
25. Evgrafov A. ANSYS HFSS. Advanced technology for three-dimensional electrodynamic problems solution. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2014;6(138):162–167. (in Russ.) EDN:SQWBTD
26. Kudinova M., Bouwmans G., Vanvincq O., Habert R., Plus S., Bernard R., et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses. *APL Photonics*. 2021;6:2. DOI:10.1063/5.0028195. EDN:UAKRHQ
27. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Butt M.A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review. *Micromachines*. 2024;15(11):1321. DOI:10.3390/mi15111321. EDN:OMVMDO
28. Chesnokova M., Nurmukhametov D., Ponomarev R., Agliullin T., Kuznetsov A., Sakhabutdinov A., et al. Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer. *Photonics*. 2024;11(8):712. DOI:10.3390/photonics11080712. EDN:NHSVWJ
29. Zhang D., Li Y. A RISC-V 32-bit microprocessor on two-dimensional semiconductor platform. *Journal of Semiconductors*. 2025;46(8). DOI:10.1088/1674-4926/25050016
30. Saha S., Pal S., Ganguly J., Ghosh M., et al. Exploring optical refractive index change of impurity doped quantum dots driven by white noise. *Superlattices and Microstructures*. 2015;88:620–633. DOI:10.1016/j.spmi.2015.10.021
31. Baldi M., Ofek Y. *Realizing Dynamic Optical Networking*. URL: chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcglclefindmkaj/https://staff.polito.it/mario.baldi/publications/ONM2003.pdf [Accessed 08.10.2025]
32. Agrawal D., Baldi M., Corra M., Fontana G., Marchetto G., Nguyen V.T. A Scalable Approach for Supporting Streaming Media: Design, Implementation and Experiments. *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, 01–04 July 2007, Santiago, Portugal*. IEEE; 2007. p.211–217. DOI:10.1109/ISCC.2007.4381589
33. Baldi M., Ofek Y. Fractional Lambda Switching Principles of Operation and Performance Issues. *Simulation*. 2004;80(10):527–544. DOI:10.1177/0037549704046
34. Follett D.R., Sobin D.L. *Optical backplane*. Patent USA, no. 4870637A, 24.12.1987. https://patents.google.com/patent/US4870637A/en
35. Jorepalli S. Transforming Network Architectures with VMware NSX-T Data Centre: A Deep Dive into Software-Defined Networking for Multi-Cloud Environments. *Applied Science and Engineering Journal for Advanced Research*. 2025;4(1):7–12. DOI:10.5281/zenodo.14784450
36. Xue X., Calabretta N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks. *Nature Communications*. 2022;13(1):2257. DOI:10.1038/s41467-022-29913-1. EDN:DVCWFP
37. Singh O., Paulus R. A critical review of optical switches. *Journal of Optical Communications*. 2023;44(1):349–358. DOI:10.1515/joc-2020-0284
38. Lei Y., Li J., Liu Z., Joshi R., Xia Y. Nanosecond Precision Time Synchronization for Optical Data Center Networks. *arXiv:2410.17012*. 2024.

39. Eremenko V.T., Fisun A.P., Saitov I.A., Mironov A.E., Oreshin A.N., Korolev A.V. *Methods and Models of Teletraffic Theory*. Orel: Oryol State University named after I.S. Turgenev Publ.; 2019. 244 p. (in Russ.)
40. Bachev A.G., Vakulenko N.N., Zakharov M.K. Mathematical model of a data exchange network with packet switching. *Software and Systems*. 2010;1:158–161. (in Russ.) EDN:MNKMVL
41. Huang S. Wang M., Liu Y., Liu Z., Cui Y. Iphicles: Tuning Parameters of Data Center Networks with Differentiable Performance Model. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Quality of Service, IWQoS, 19–21 June 2024, Guangzhou, China*. IEEE; 2024. p.1–10. DOI:10.1109/IWQoS61813.2024.10682926
42. Treshchikov V.N., Listvin V.N. *DWDM systems*. Moscow: Technosfera Publ.; 2021. 420 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 16.08.2025; принята к публикации 12.09.2025.

The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 16.08.2025; accepted for publication 12.09.2025.

Информация об авторах:

ВИНОГРАДОВА
Ирина Леонидовна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий, профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика» Уфимского государственного нефтяного технического университета
 <https://orcid.org/0000-0003-4618-6843>

СУЛТАНОВ
Альберт Ханович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>

ГОЛОВИНА
Евгения Юрьевна

старший преподаватель кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате
 <https://orcid.org/0009-0006-3624-5490>

КОМИССАРОВ
Аркадий Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0009-0004-2809-4309>

ФИЛАТОВ
Павел Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0009-0007-2607-033X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 621.396.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126>

EDN:HBVZAJ



Оценка эффективности механизмов случайного и определенного доступа абонентов к широкополосной сети спутниковой связи

Михаил Сергеевич Парфенов¹ ✉, mikhail.parfenov.88.88@bk.ru

Владислав Александрович Фукалов¹, vladfukalov@ya.ru

Александр Александрович Шевченко², alex_pavel1991@mail.ru

Дмитрий Федорович Ткачев¹, dimas.portnoy@inbox.ru

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

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Рост числа терминалов и интенсивности подключений в спутниковых сетях с топологией «звезда» обостряет задачу выбора эффективного механизма доступа к общему радиоканалу. Существующие подходы – определенный (TDMA) и случайный (ALOHA) доступ – имеют существенные ограничения, а критерии их выбора в зависимости от нагрузки недостаточно формализованы.

Целью исследования является сравнение эффективности двух рассматриваемых механизмов и выявления условий, при которых один из них обеспечивает лучшую производительность. В ходе исследования были использованы **методы** аналитического и имитационного моделирования. Для случайного доступа строго выведена формула математического ожидания числа слотов, занятых ровно одним терминалом. Аналитическая модель верифицирована с помощью стохастического моделирования на Python.

Результат. Получена и подтверждена аналитическая модель, точно прогнозирующая эффективность случайного доступа.

Научная новизна. Впервые строго выведена и верифицирована формула для ожидаемого числа успешно занятых слотов, что позволяет оценивать производительность без ресурсоемкого моделирования. Установлен количественный критерий выбора между определенным и случайным доступом. Модель учитывает реальную конкуренцию терминалов и применима к протоколам ALOHA и TDMA.

Практическая значимость. Представленное решение предлагается использовать при проектировании и адаптивном управлении МАС-уровнем в спутниковых сетях VSAT, IoT-системах и сетях телеметрии. Полученные критерии выбора механизма доступа могут быть реализованы в виде алгоритмов динамической реконфигурации в программно-конфигурируемых сетях (SDN), позволяя автоматически переключаться между режимами в зависимости от текущей нагрузки. Это обеспечит оптимальное использование полосы пропускания, минимизацию задержек и повышение общей устойчивости сети.

Ключевые слова: случайный доступ, математическое ожидание, симуляция, вероятностное распределение, эффективность механизма, спутниковая сеть, топология «звезда», аналитическая модель, оценка производительности, многоканальный доступ, стохастическое моделирование

Ссылка для цитирования: Парфенов М.С., Фукалов В.А., Шевченко А.А., Ткачев Д.Ф. Оценка эффективности механизмов случайного и определенного доступа абонентов к широкополосной сети спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 119–126. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126. EDN:HBVZAJ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126>

EDN:HBVZAJ

Effectiveness Evaluation of Random and Defined Subscriber Access Mechanisms to a Broadband Satellite Communications Network

✉ Mikhail S. Parfenov¹, mikhail.parfenov.88.88@bk.ru

Vladislav A. Fukalov¹, vladfukalov@ya.ru

Alexandr A. Shevchenko², alex_pavel1991@mail.ru

Dmitriy F. Tkachev¹, dimas.portnoy@inbox.ru

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

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Annotation

Relevance. The increase in the number of terminals and the intensity of connections in satellite communication networks with the «star» topology actualizes the problem of choosing an effective mechanism for accessing a common radio channel. The well-known approaches of deterministic and random access have significant limitations. At the same time, there are no clear analytical criteria for choosing between mechanisms depending on the load, which makes it difficult to optimize network performance.

Purpose (research): The aim is to compare the effectiveness of two mechanisms for entering satellite terminals into a network with the "star" topology: with specific slot access and with random access. The assessment is aimed at identifying conditions under which one of the mechanisms is superior to the other in key performance indicators.

Methods. The solution of the problem is based on a combination of analytical and simulation modeling. To evaluate the effectiveness of random access, a strict combinatorial derivation of the mathematical expectation formula for the number of slots selected by exactly one terminal was carried out. The verification of the analytical model was performed using stochastic modeling in Python.

Result. A validated analytical model has been obtained that makes it possible to accurately predict the effectiveness of the random access mechanism. The data obtained is applicable in the design of satellite communication networks to optimize terminal entry time and channel resource allocation. **The novelty** elements are rigorous analytical inference and verification of the formula for the mathematical expectation of the number of successfully occupied slots with random access, which allows you to accurately predict performance without large-scale modeling. The novelty also includes the establishment of a quantitative criterion for choosing an access mechanism. The proposed model takes into account the real conditions of terminal competition for channel resources and is applicable to the analysis of protocols such as ALOHA and TDMA.

Practical significance. The presented solution is proposed to be used in the design and adaptive management of the MAC layer in VSAT satellite networks, IoT systems and telemetry networks. The obtained criteria for selecting an access mechanism can be implemented as dynamic reconfiguration algorithms in software-configurable networks, allowing automatic switching between modes depending on the current load. This will ensure optimal use of bandwidth, minimize delays, and increase overall network stability.

Keywords: random access, mathematical expectation, simulation, probability distribution, mechanism efficiency, satellite network, star topology, analytical model, performance evaluation, multichannel access, stochastic modeling

For citation: Parfenov M.S., Fukalov V.A., Shevchenko A.A., Tkachev D.F. Effectiveness Evaluation of Random and Defined Subscriber Access Mechanisms to a Broadband Satellite Communications Network. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):119–126. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-119-126. EDN:HBVZAJ

Введение

В современных спутниковых системах связи важную роль играет организация эффективного доступа терминалов к сетевым ресурсам, особенно в сетях с топологией «звезда», где все терминалы взаимодействуют через центральный узел – спутник или наземную станцию [1]. Такие архитектуры широко используются в системах спутниковой связи типа VSAT (аббр. от англ. Very Small Aperture Terminal), где центральная станция управляет обменом данными с распределенными терминалами [2]. В таких сетях особенно актуальна задача быстрого и надежного входа терминалов в сеть, в том числе при периодическом или случайном подключении большого числа пользователей. От эффективности механизма входа напрямую зависит задержка установления соединения, использование полосы пропускания и общая производительность системы [3]. При этом важно минимизировать коллизии, избыточные попытки доступа и время ожидания, особенно в условиях ограниченной пропускной способности радиоканала.

В данной статье рассматриваются два подхода к организации входа терминалов в сеть: механизм определенного доступа (с арбитром) и механизм произвольного (случайного) доступа. В первом случае каждый терминал получает предварительно назначенный слот для передачи запроса на вход, что обеспечивает детерминированное поведение системы [4]. Такой подход реализуется, например, в системах с централизованным планированием (TDMA с центральным контроллером) [5]. Во втором – каждый терминал случайным образом выбирает один из доступных слотов, что приводит к возможным коллизиям, но позволяет избежать централизованного управления и снижает задержку при низкой нагрузке [6]. Примером является протокол ALOHA или его модификации, широко применяемые в спутниковых и беспроводных сетях [7].

Целью исследования является сравнительный анализ эффективности этих двух механизмов в зависимости от ключевых параметров: числа терминалов, числа выделенных слотов и характера нагрузки. Особое внимание уделено аналитическому моделированию механизма случайного доступа, его верификации посредством имитационного моделирования и практической интерпретации результатов для проектирования реальных спутниковых сетей [8].

Симуляция выбора терминалами слотов для входа

Оценка эффективности механизма определенного доступа проста – количество терминалов, успешно выбравших слот, равно общему количеству слотов, выделенных для входа. Это обеспечи-

вает 100-процентную эффективность при $N \leq K$, где N – число терминалов; K – число слотов. Однако такой механизм требует централизованного управления и предварительной синхронизации, что увеличивает сложность системы [9].

Для оценки эффективности механизма произвольного доступа используется симуляция. Симуляция представляет собой функцию, написанную на языке Python. Функция принимает два аргумента: первый (K) – общее количество выделенных слотов для входа, второй (N) – общее количество терминалов, каждый из которых выбирает один слот из K возможных. В теле функции происходит подсчет количества слотов, выбранных только один раз, в 100 000 экспериментах. На выходе симуляции получается распределение случайной величины k – количества слотов, выбранных ровно один раз для фиксированных K и N [10]. Такой подход позволяет оценить не только математическое ожидание, но и дисперсию, форму распределения и вероятность успешного входа. Результаты симуляции визуализируются в виде гистограмм, которые отображены на рисунке 1, что дает наглядное представление о поведении системы при $K = 50$ и разных нагрузках.

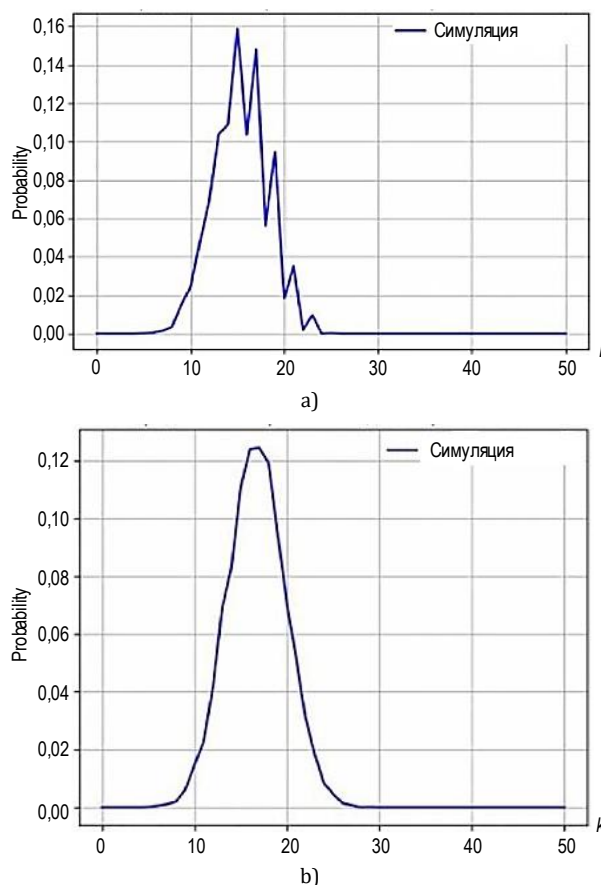


Рис. 1. График распределения вероятности для k при: а) $N = 25$; б) $N = 76$

Fig. 1. Graph of the Probability Distribution for k at: a) $N = 25$; b) $N = 76$

Аналитический вывод выражения для математического ожидания числа удачно выбранных слотов

Для строгой оценки эффективности механизма случайного доступа был проведен аналитический вывод выражения для математического ожидания числа слотов, выбранных ровно один раз.

1) Для любой конкретной системы из K слотов для входа и N терминалов, избирающих равновероятно ячейку от 1 до K , можно построить множество всевозможных последовательностей, состоящих из номеров слотов, выбранных каждым терминалом.

Для примера при $N = 3, K = 2$ – это множество будет состоять из следующих последовательностей:

1, 1, 1
1, 1, 2
1, 2, 1
1, 2, 2
2, 1, 1
2, 1, 2
2, 2, 1
2, 2, 2

Мощность этого множества равна K^N [11].

2) Множество всех последовательностей назовем $A_{\geq 0}$ – содержит в себе последовательности с 0 или большим числом не повторяющихся номеров.

Множество $A_{\geq 1}$, содержащее в себе последовательности с 1 или большим числом не повторяющихся номеров, будет полностью вложено во множество $A_{\geq 0}$.

Так, получаем последовательность вложенных множеств:

$$\{... \subset A_{\geq k} \subset A_{\geq k-1} \subset ... \subset A_{\geq 1} \subset A_{\geq 0}\}. \quad (1)$$

3) Можно заметить, что мощность множества, состоящего из последовательностей только с числом k не повторяющихся номеров, равна:

$$|A_{=k}| = |A_{\geq k}| - |A_{\geq k+1}|.$$

Значит, для вычисления числа возможных последовательностей с k не повторяющимися номерами достаточно вывести выражение для оценки мощности множества $A_{\geq k}$.

4) Мощность множества $A_{\geq k}$ можно вычислить, исходя из следующего:

- пусть есть K слотов для входа N терминалов:
□ □ □ □ ... □;
- первый терминал может выбрать любой слот из K возможных: □ □ □ ■ □ ... □;
- второй терминал может выбрать любой слот из $K - 1$ возможных: □ ■ □ ■ □ ... □;
- k -й терминал может выбрать любой слот из $K - k + 1$ возможных;
- остальные терминалы могут выбрать любые из $K - k$ незанятых слотов.

Тогда в первом приближении, с учетом выбора k терминалов из N , мощность множества $A_{\geq k}$ можно представить в виде выражения:

$$|A_{\geq k}| = K(K-1) \dots (K-k+1) \times (K-k)^{(N-k)} \times \times C_k^N = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{(N-k)} \times C_k^N. \quad (2)$$

5) Выражение (2) учитывает последовательности, состоящие из $i > k$ не повторяющихся элементов C_k^i раз вместо 1, в силу пересечения множеств из $\geq k$ числа не повторяющихся элементов, поэтому необходимо скомпенсировать число этих последовательностей вот так:

$$|A_{\geq k}| = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{(N-k)} \times \times C_k^N - \sum_{i=k-1}^{\min(K,N)} |A_{=i}| \times (C_k^i - 1). \quad (3)$$

6) Таким образом, получаем выражения:

$$|A_{=k}| = |A_{\geq k}| - |A_{\geq k+1}|, \quad (4)$$

$$|A_{=k}| = \frac{K!}{(K-k)!} \times (K-k)^{N-k} \times \times C_k^N - \sum_{i=k-1}^{\min(K,N)} |A_{=i}| \times (C_k^i - 1). \quad (5)$$

Понимая, что компенсация во втором выражении вырождается в ноль для $k = K$, можно рекурсивно считать количество возможных последовательностей для каждого k и, следовательно, – вычислять вероятность при фиксированных K, N , а также – математическое ожидание k .

Сравнение распределений случайной величины k , получаемых от симуляции и от выведенной функции распределения

Покажем справедливость выведенных выражений, сравнив распределение от симуляции с распределением по формуле. Для этого выведенные выражения переведем в функцию Python, которая, как и симуляция, будет возвращать распределение случайной величины k – количество слотов, которые были выбраны один раз. Также сравним математическое ожидание этой величины от симуляции и от формулы (рисунок 2) при $K = 36$.

Для проверки корректности аналитических выражений проведено сравнение распределения, полученного по формуле, с результатами симуляции:

- $K = 36, N = 20$: математическое ожидание по формуле = 11,71, по симуляции = 11,708 – расхождение менее 0,1 % (рисунок 2а);
- $K = 36, N = 1$: $E[k] = 1,0$ – ожидаемо, один терминал всегда успешно выбирает слот (рисунок 2б);
- $K = 36, N = 47$: пик около 10–12, что соответствует высокой вероятности коллизий (рисунок 2с).

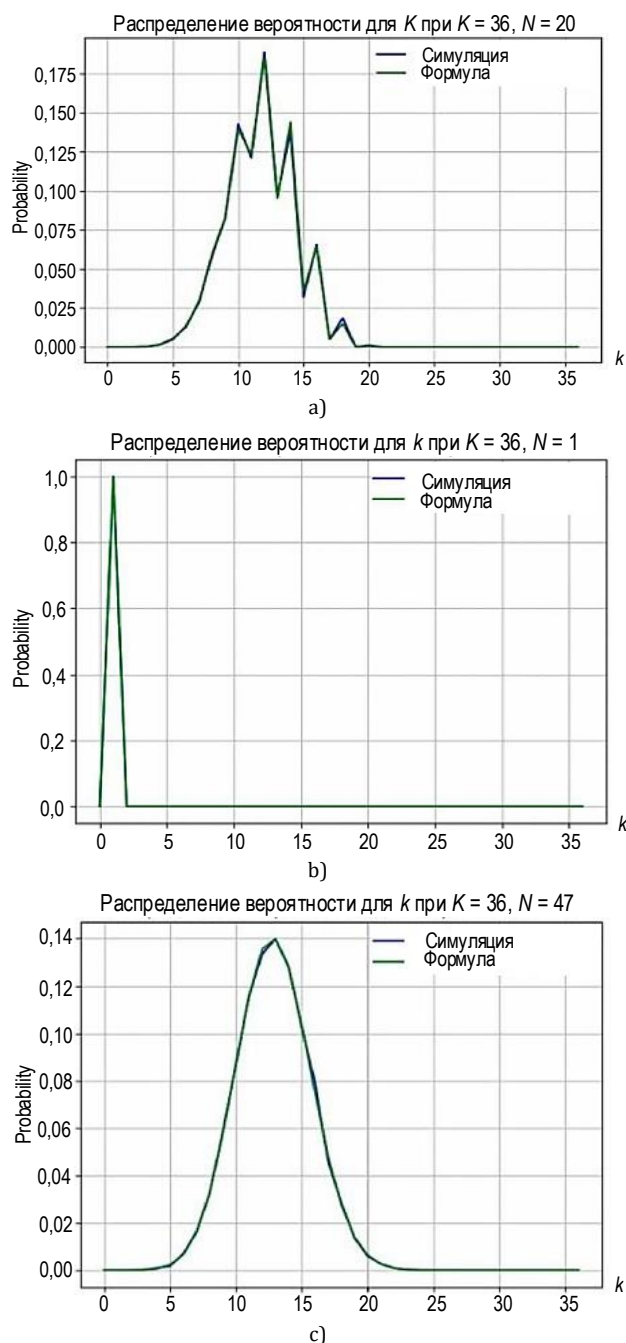


Рис. 2. График распределения вероятности для k :
а) $N = 20$; б) $N = 1$; в) $N = 47$

Fig. 2. Graph of the Probability Distribution for k : а) $N = 20$; б) $N = 1$; в) $N = 47$

Во всех случаях распределение, полученное по аналитической формуле, совпадает с результатами симуляции с высокой точностью. Это подтверждает справедливость вывода для любого количества терминалов N и любого количества слотов K . Такой уровень согласования позволяет использовать аналитическую модель для прогнозирования производительности без необходимости масштабного моделирования.

Сравнение эффективности механизмов произвольного и определенного доступа для входа терминалов в сеть

1) Начнем сравнение эффективности механизмов с оценки количества терминалов, успешно занявших слот при фиксированном значении количества слотов для входа $K = 50$ и переменном значении общего количества терминалов N , которые пытаются занять слот (рисунки 3–4).

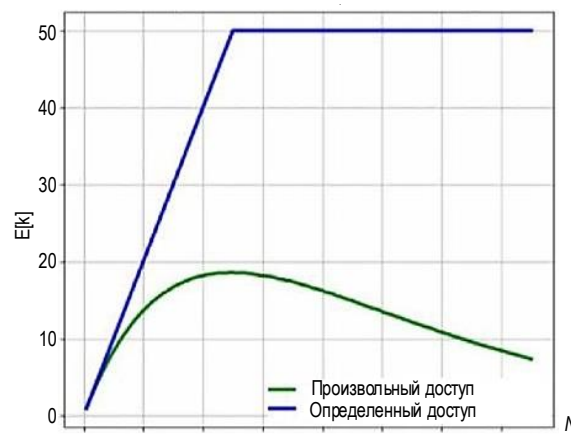


Рис. 3. График зависимости количества терминалов, занявших слот k , от общего количества N

Fig. 3. Graph of the Dependence of the Number of Terminals Occupying Slot k on the Total Number of N



Рис. 4. График отношения механизмов произвольного и определенного доступа

Fig. 4. Graph of the Relationship between Random and Defined Access Mechanisms

Согласно графику, приведенному на рисунке 3, пик эффективности механизма произвольного доступа наступает тогда, когда количество слотов, выделенных для входа, равняется количеству входящих терминалов. Отсюда следует, когда число слотов K , выделенных для входа приблизительно равно числу терминалов N , желающих войти, эффективность входа механизма произвольного доступа составляет 35–40 % от эффективности механизма определенного доступа.

2) Теперь оценим количество фреймов, требуемое для входа N терминалов, при $K = 50$, выделенных под вход слотов. Будем считать, что для входа терминалам требуется успешно занять ровно один слот. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов, показан на рисунке 5.



Рис. 5. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов

Fig. 5. Graph of the Dependence of the Number of Frames Required for the Input of N Terminals

По графику видно, что при числе терминалов N , много большим числа выделенных под вход слотов K время входа по механизму произвольного доступа стремится к бесконечности. Время входа по механизму определенного доступа, напротив, растет линейно по мере увеличения количества терминалов N .

3) В конце оценим эффективность входа терминалов в сеть по двум механизмам при стационарной работе, когда общее количество терминалов не в сети M не равно количеству терминалов N , желающих войти в сеть одновременно. Число слотов K , выделяемое под вход, возьмем равным числу N . Также число успешно занятых слотов для входа одного терминала сделаем варьируемым параметром. Результаты проиллюстрированы на рисунке 6.

При стационарной работе можно наблюдать обратную ситуацию – механизм произвольного доступа эффективнее механизма определенного доступа до количества терминалов N , желающих войти одновременно, меньше произведения общего количества терминалов не в сети M на относительную эффективность механизма произвольного доступа по отношению к механизму определенного доступа. Относительная эффективность для каждой конфигурации K, N . Для текущего эксперимента, где $K = N$, механизм произвольного доступа будет эффективней при $N < M * 0,4$. Так происходит из-за того, что при входе механизмом определенного доступа слоты для входа выделяются поочередно для каждого терминала не в се-

ти. Это значит, что каждый из N терминалов получает свой слот только каждые M слотов. Механизм же произвольного доступа этого недостатка лишен, потому что каждый из слотов может занять каждый из терминалов.

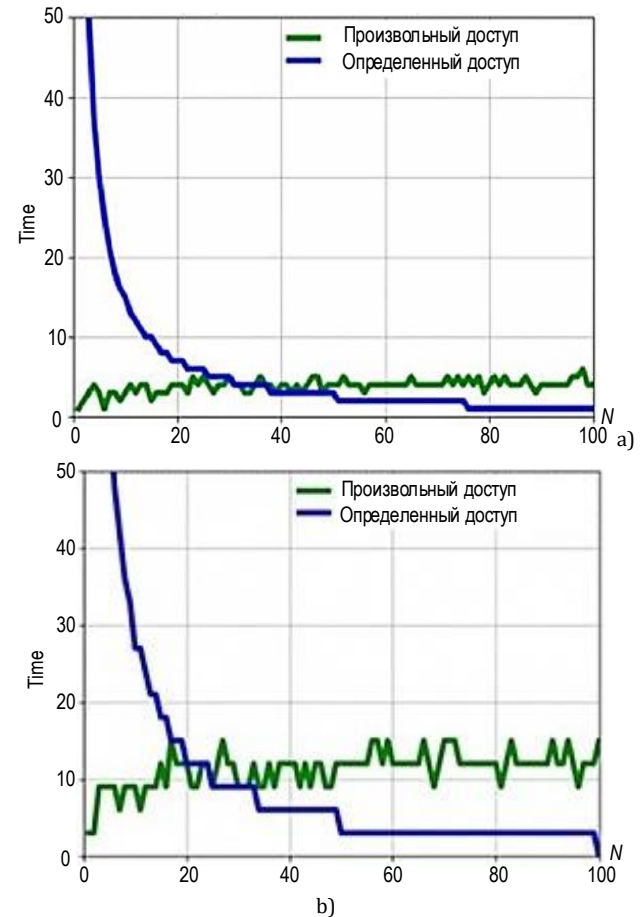


Рис. 6. График зависимости количества фреймов, требуемых для входа N терминалов из 150 (а) и 99 (б) терминалов не в сети

Fig. 6. Graph of the Dependence of the Number of Frames Required for the Input of N Terminals out of 150 and 99 (b) Terminals Offline

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что выбор между механизмами случайного и определенного доступа (с арбитром) для входа терминалов в спутниковую сеть с топологией «звезда» не может быть однозначным, и должен опираться на конкретные условия эксплуатации сети, такие как плотность подключений, общее число терминалов, частота входа и требования к задержке. Анализ показал, что каждый из механизмов обладает своими сильными и слабыми сторонами, и их эффективность кардинально меняется в зависимости от нагрузки [11].

Механизм произвольного (случайного) доступа оказывается наиболее эффективным в условиях низкой или умеренной нагрузки, когда число терминалов, одновременно желающих войти в сеть,

существенно меньше или сопоставимо с числом выделенных слотов. В таких сценариях он обеспечивает высокую гибкость, отсутствие необходимости в централизованном планировании и минимальные задержки при входе. Особенно выгодным этот механизм становится в стационарных сетях, где общее число терминалов велико, но активными являются лишь их фрагмент. В этом случае, как показывают результаты моделирования, представленные на рисунке 6, механизм случайного доступа позволяет терминалам входить в сеть быстрее, поскольку не требует ожидания своей «очереди» в циклическом распределении. При $N < 0,4M$, где M – общее число терминалов, а N – число активных, он превосходит механизм с арбитром по скорости установления соединения.

Однако при высокой нагрузке, когда число терминалов N превышает число доступных слотов K , эффективность случайного доступа резко падает из-за роста коллизий. Вероятность того, что два или более терминалов выберут один и тот же слот, стремится к единице, что приводит к необходимости многократных повторных попыток [12]. Как показано на рисунке 5, время входа при таком механизме растет нелинейно и может стремиться к бесконечности при значительной перегрузке. Это делает его неприемлемым для систем с высокой плотностью подключений или жесткими требованиями к предсказуемости задержки.

В свою очередь, механизм определенного доступа, несмотря на необходимость централизованного управления и синхронизации, обеспечивает стабильную и детерминированную производительность. Количество успешно входящих терминалов в каждом фрейме предсказуемо и равно

$\min(N, K)$, а общее время входа растет линейно. Это делает его идеальным выбором для критически важных приложений, где требуется гарантированная пропускная способность и минимальные колебания задержки – например, в системах военной связи, телеметрии или управления инфраструктурой.

Научная значимость работы заключается в строгом комбинаторном выводе аналитической модели для математического ожидания числа успешно занятых слотов при случайном доступе, что позволяет прогнозировать производительность без масштабного моделирования. Верификация модели с помощью имитационного моделирования на Python подтвердила ее высокую точность (погрешность менее 0,5 %), что открывает возможности для ее использования в автоматизированных системах проектирования сетей.

Практическая ценность исследования состоит в разработке методики выбора оптимального механизма доступа на основе анализа сценария использования. Предложенные критерии (например, $N < 0,4M$) могут быть включены в алгоритмы адаптивного управления MAC-уровнем в спутниковых системах, IoT-сетях и других распределенных архитектурах.

В перспективе, результаты могут быть развиты для анализа гибридных механизмов, сочетающих элементы обоих подходов, а также для учета реальных факторов: задержек распространения сигнала, эффекта захвата (capture effect), помех и мобильности терминалов. Это позволит создавать более устойчивые и эффективные протоколы доступа для современных и будущих спутниковых сетей связи.

Список источников

1. Зинкин С.В., Мурсаев А.Н. Особенности многостанционного доступа с временным разделением каналов в системах спутниковой связи // Наука, техника и образование. 2021. Т. 7(82). С. 11–15. DOI:10.24411/2312-8267-2021-10701. EDN:DOOFCL
2. Перегудов М.А., Стешковой А.С. Модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 128–154. DOI:10.15622/sp.2020.19.1.5. EDN:UHASTF
3. Pratt T., Bostian C.W., Allnutt J.E. Satellite Communications. Wiley, 2003.
4. Stallings W. Data and Computer Communications. Pearson, 2017.
5. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб.: ВАС, 2021. EDN:YKTFWD
6. Аниканов Г.А., Коновальчик П.М., Моргунов В.М., Овчаров В.А. Контролируемый многомодельный доступ к среде беспроводных сетей передачи данных // Труды СПИИРАН. 2015. № 1(38). С. 246–286. EDN:TQURCP
7. Petkovic M., Devaja T., Vukobratovic D., Escibano F.J., Stefanović Č. Reliability Analysis of Slotted Aloha with Capture for an OWC-based IoT system // Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS, Berlin, Germany, 06–09 September 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/ISWCS49558.2021.9562172
8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Pearson, 2021.
9. Степанов С.Н. Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и трафика данных. II // Автоматика и телемеханика. 2011. № 5. С. 139–147. EDN:NTUBKV
10. Чуднов А.М., Положинцев Б.И., Кичко Я.В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–47. DOI:10.18127/j00338486-202212-03. EDN:BDEIHK

11. Пономарев Д.Ю., Демичева А.А., Гаипов К.Э. Имитационная модель обслуживания вызовов в спутниковой сети с учетом использования частотного ресурса // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 4(43). С. 29. DOI:10.26102/2310-6018/2023.43.4.014. EDN:LBZEVH
12. Ross S.M. Introduction to Probability Models. Academic Press, 2019.

References

1. Zinkin S.V., Mursaev A.N. Features of multi-station access with temporary channel separation in satellite communication systems. *Science, Technology and Education*. 2021;7(82):11–15. (in Russ.) DOI:10.24411/2312-8267-2021-10701. EDN:DOOFCL
2. Peregudov M., Steshkov A. Digital Radio Networks Centralized Elements Synchronization Model with Random Multiple Access to the CSMA/CA Type Medium. *SPIIRAS Proceedings*. 2020;19(1):128–154. (in Russ.) DOI:10.15622/sp.2020.19.1.5. EDN:UHASTF
3. Pratt T., Bostian C.W., Allnutt J.E. *Satellite Communications*. Wiley; 2003.
4. Stallings W. *Data and Computer Communications*. Pearson; 2017.
5. Chudnov A.M. *Mathematical Foundations of Modeling, Analysis and Synthesis of Systems*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2021. (in Russ.) EDN:YKTFWD
6. Anikanov G.A., Konovalchik P.M., Morgunov V.M., Ovcharov V.A. The Multi-Controlled Media Access to Wireless Data Networks. *SPIIRAS Proceedings*. 2015;1(38):246–286. (in Russ.) EDN:TQURCP
7. Petkovic M., Devaja T., Vukobratovic D., Escibano F.J., Stefanović Č. Reliability Analysis of Slotted Aloha with Capture for an OWC-based IoT system. *Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS, 06–09 September 2021, Berlin, Germany*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/ISWCS49558.2021.9562172
8. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Pearson; 2021.
9. Stepanov S.N. A model of joint maintenance of real-time service traffic and data traffic II. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2011;5:139–147. (in Russ.) EDN:NTUBKV
10. Chudnov A.M., Polozhintsev B.I., Kichko Ya.V. Analysis of Data Exchange Immunity UAV Groups Under Optimized Interference. *Radioengineering*. 2022;86(12):33–47. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202212-03. EDN:BDEIHK
11. Ponomarev D.Yu., Demicheva A.A., Gaipov K.E. Simulation model of call service in a satellite network with consideration to frequency resource utilization. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2023;4(43):29. DOI:10.26102/2310-6018/2023.43.4.014. (in Russ.) EDN:LBZEVH
12. Ross S.M. *Introduction to Probability Models*. Academic Press; 2019.

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 19.10.2025; принята к публикации 20.10.2025.

The article was submitted 24.09.2025; approved after reviewing 19.10.2025; accepted for publication 20.10.2025.

Информация об авторах:

ПАРФЕНОВ
Михаил Сергеевич

адъюнкт научно-исследовательского центра Военной академии связи им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0000-9118-0200>

ФУКАЛОВ
Владислав Александрович

старший оператор роты (научной) Военной академии связи им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0008-9068-9054>

ШЕВЧЕНКО
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9113-1089>

ТКАЧЕВ
Дмитрий Федорович

кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского центра Военной академии связи им. С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0004-2256-9270>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Обзорная статья

УДК 004.75

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144>

EDN:HYREKC



Сеть вычислительных мощностей (CPN)

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

Павел Алексеевич Алексахин, p.aleksahin@psuti.ru

Валерий Андреевич Михайлов, v.mihaylov@psuti.ru

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

Аннотация

В данной статье рассматривается концепция сети вычислительных мощностей CPN (Computing Power Network) – новой парадигмы распределенных вычислений, предназначенной для распределения, управления и оптимального использования вычислительных ресурсов по запросу пользователей по аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах.

Актуальность исследования обусловлена тем, что с развитием цифрового общества все больше и больше приложений требуют не только высокой вычислительной мощности, но и низкой задержки, что делает вычисления и сети связи тесно интегрированными. В отличие от технологий облачных, граничных и туманных вычислений, требуется новая парадигма организации территориально-распределенных вычислений, которая сможет обеспечить более гибкое, эффективное и качественное предоставление вычислительных мощностей по запросу пользователей для поддержки разнообразных перспективных приложений (искусственный интеллект / машинное обучение, анализ больших данных, промышленный интернет вещей, умное производство, беспилотный транспорт и др.). По аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах, сравнительно недавно была предложена новая модель распределения вычислительных ресурсов – CPN. Она представляет «вычислительную энергию», которая может передаваться, накапливаться и потребляться в распределенной сети узлов – аналогично тому, как электрическая энергия распределяется между генераторами, подстанциями и потребителями в энергосетях.

Цель исследования – изучение архитектурных и функциональных особенностей сетей вычислительных мощностей, а также анализ современного состояния международной стандартизации данной технологии.

Методы включают обзор научной и нормативной литературы, оценку состояния уровня международной стандартизации технологий сетей вычислительных мощностей.

Результаты. В ходе исследования были проанализированы общие принципы построения, структура и функциональная архитектура сети вычислительных мощностей и определено, что для полноценного функционирования CPN требуется развитая сетевая инфраструктура, прежде всего на базе технологий программно-конфигурируемых сетей SDN и платформ управления сетью с использованием искусственного интеллекта.

Новизна. Проведенное исследование является первой попыткой провести системный анализ концепции сети вычислительных мощностей в контексте русскоязычной научной литературы. Работа восполняет существующий пробел в отечественной науке, предлагая всесторонний взгляд на возможности построения и функционирования сети вычислительных мощностей с использованием технологий существующих и перспективных сетей связи.

Теоретическая значимость работы заключается в создании основы для изучения и интеграции перспективных сетей фиксированной F5G и мобильной 5G / 6G связи с облачными и периферийными вычислениями для реализации концепции сети вычислительных мощностей.

Ключевые слова: распределенные вычисления, облачные вычисления, периферийные вычисления, сеть вычислительных мощностей, архитектура, принцип работы, стандарты МСЭ-Т

Ссылка для цитирования: Росляков А.В., Алексахин П.А., Михайлов В.А. Сеть вычислительных мощностей (CPN) // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 127–144. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144. EDN:HYREKC

Review research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144>

EDN:HYREKC

Computing Power Network (CPN)

✉ **Alexandr V. Roslyakov**, a.roslyakov@psuti.ru

Pavel A. Aleksakhin, p.aleksahin@psuti.ru

Valery A. Mikhailov, v.mihaylov@psuti.ru

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

Annotation

This article discusses the concept of the Computing Power Network (CPN), a new paradigm of distributed computing designed to distribute, manage and optimally use computing resources on demand by users, similar to the distribution of electrical energy in power systems.

The relevance of the study is due to the fact that with the development of the digital society, more and more applications require not only high computing power, but also low latency, which makes computing and communication networks tightly integrated. In contrast to cloud, edge and fog computing technologies, a new paradigm for organizing geographically distributed computing is required that can provide more flexible, efficient and high-quality provision of computing power on demand by users to support a variety of promising applications (artificial intelligence / machine learning, big data analysis, industrial Internet of Things, smart manufacturing, unmanned transport, etc.). By analogy with the distribution of electrical energy in power systems, a new model for distributing computing resources was recently proposed - CPN. It provides computing power as "computing energy" that can be transmitted, accumulated and consumed in a distributed network of nodes - similar to how electrical energy is distributed between generators, substations and consumers in power grids.

The aim of this study is to study the architectural and functional features of computing power networks, as well as to analyze the current state of international standardization of this technology.

Methods include analysis of scientific and regulatory literature, assessment of the state of the level of international standardization of computing power network technologies.

Results. The study analyzed the general principles of construction, structure and functional architecture of the computing power network, and determined that the full functioning of CPN requires a developed network infrastructure, primarily based on software-defined network technologies SDN and network management platforms using artificial intelligence.

Scientific novelty. The study is the first attempt to conduct a system analysis of the computing power network concept in the context of Russian-language scientific literature. The work fills the existing gap in domestic science, offering a comprehensive view of the possibilities of building and operating a network of computing power using technologies of existing and prospective communication networks.

The theoretical significance of the work lies in creating a basis for studying and integrating prospective fixed and mobile 5G / 6G communication networks with cloud and edge computing to implement the concept of a network of computing power.

Keywords: distributed computing, cloud computing, edge computing, computing power network, architecture, operating principle, ITU-T standards

For citation: Roslyakov A.V., Aleksakhin P.A., Mikhailov V.A. Computing Power Networks (CPN). *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):127–144. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144. EDN:HYREKC

Введение

Современное развитие цифровых технологий и их активное проникновение в различные отрасли и

сферы человеческой деятельности сопровождается стремительным ростом вычислительных мощностей и увеличением количества распределенных

вычислительных систем. Так, широкомасштабное применение алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в различных отраслях требует больших вычислительных ресурсов. В эпоху облачных вычислений существует тенденция к созданию централизованных пулов вычислительных ресурсов для решения этой проблемы. Однако в ряде случаев эти централизованные пулы не удовлетворяют требованиям выполняемых задач, поскольку необходимо выбирать соответствующие узлы вычислительной мощности с учетом характеристик приложений, стоимости вычислений и условий работы сети.

Необходимость повсеместных вычислительных ресурсов объясняет пример аппаратно-программной системы контроля и управления доступом, основанной на распознавании лиц на базе ИИ (рис. 1) [1]. В этой системе выполнение сложных вычислительных процессов для обучения ИИ в автономном режиме может быть развернуто в централизованных вычислительных центрах, таких как облачный дата-центр. Однако на этапе анализа изображений, например, при распознавании лица для открытия двери, следует учитывать фактор задержки. Если изображение или видеоинформация отправляются в центр облачных вычислений для обработки, время ожидания может оказаться слишком большим и неприемлемым на практике.

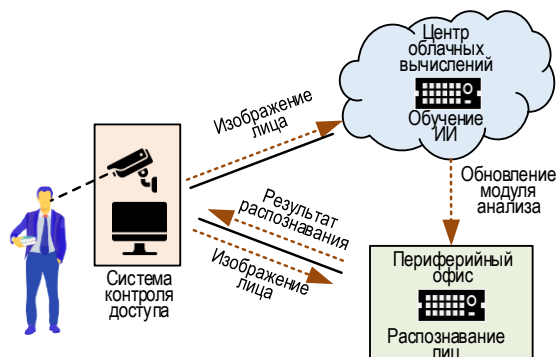


Рис. 1. Система управления доступом на основе распознавания лица (источник: МСЭ-Т)

Fig. 1. Access Control System Based on Face Recognition (Source: ITU-T)

Следовательно, при реализации конкретной услуги следует учитывать не только необходимые ресурсы вычислительной мощности, а также время и стоимость обработки и передачи данных. Полностью централизованные пулы вычислительных ресурсов не всегда могут удовлетворить этим требованиям, в то время как распределенные решения, такие как периферийные вычислительные узлы, обладают очевидными преимуществами в отношении пропускной способности и задержки, что позволяет удовлетворять требования конкретных услуг.

В условиях глобальной цифровизации особое значение приобретает рациональное использо-

вание вычислительных и энергетических ресурсов, что требует новых подходов к организации вычислений и управления ими. Эффективным решением этой проблемы является объединение территориально распределенных ресурсов вычислений и хранения данных в единую инфраструктуру. Именно такую модель вычислений реализует сеть вычислительных мощностей (CPN, аббр. от англ. Computing Power Network) – сетевая структура, предназначенная для распределения, управления и оптимального использования вычислительных ресурсов по аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах. Актуальность концепции CPN обусловлена необходимостью обеспечения устойчивости, масштабируемости и энергоэффективности современных информационных систем, а также ростом популярности таких моделей вычисления, как периферийные (граничные), туманные и облачные. Кроме того, появление и активное развитие ИИ /машинного обучения, интернета вещей, больших данных, систем дополненной реальности создает дополнительную нагрузку на вычислительную инфраструктуру, что усиливает потребность в эффективных механизмах управления распределенными вычислениями. В этой связи концепция CPN открывает новые горизонты в построении гибких, самоорганизующихся и энергооптимизированных вычислительных мощностей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать высокую производительность в условиях ограниченных ресурсов.

В принципе сама идея интеграции вычислительных и сетевых ресурсов, лежащая в основе концепции CPN, не совсем новая – она тесно связана с устоявшейся парадигмой сетевых вычислений (Grid Computing) [2] и другими соответствующими технологиями, такими как общедоступные вычисления (Utility Computing), кластерные вычисления и распределенные вычислительные системы в целом [3]. Еще в начале 2010-х гг. с развитием облачных технологий и сетевой виртуализации было предложено использовать сервисно-ориентированную архитектуру (SOA, аббр. от англ. Service-Oriented Architecture) для предоставления комбинированных облачно-сетевых услуг [4]. В дальнейшем этот подход нашел свое практическое воплощение в стандартизированной архитектуре CPN.

Проведенный анализ печатных публикаций и интернет-источников показал относительно небольшое число работ по тематике CPN и аналогичным концепциям [5–15] и практически полное отсутствие русскоязычных материалов. Лишь в работах Р.Л. Смелянского [2, 16, 17] предложена распределенная вычислительная архитектура под названием Network Powered by Computing (NPC), которая во многом совпадает с принципами реализации CPN. Поэтому целью статьи является всестороннее

рассмотрение основных положений CPN как перспективной модели организации распределенных вычислений. Представлены базовые принципы и структура CPN, ее архитектурные и функциональные особенности, состояние стандартизации, а также возможные сценарии применения в контексте современных требований к вычислительным системам.

Эволюция распределенных вычислений

Технологии распределенных вычислений за последние два десятилетия прошли значительную эволюцию, начиная с классического облачного подхода и заканчивая современными концепциями, такими как периферийные (граничные) вычисления и CPN. Каждая из этих технологий имеет свои уникальные преимущества, но также имеет определенные ограничения, которые и определяют области их эффективного применения.

Технология облачных вычислений (Cloud Computing) [18] стала фундаментом для многих современных IT-решений. Ее основная идея заключается в предоставлении вычислительных ресурсов через удаленные дата-центры, что позволяет пользователям облачных услуг масштабировать необходимые вычислительные мощности и мощности хранения данных без необходимости содержания собственной инфраструктуры. Однако у этого подхода есть существенный недостаток – высокая задержка из-за необходимости передачи данных между пользователем и облачным центром.

С развитием интернета вещей (IoT, *аббр. от англ. Internet of Things*) [19] появилась технология периферийных (граничных) (Edge Computing) и туманных вычислений (Fog Computing) [18]. В отличие от облачных вычислений, в них вычислительные ресурсы перемещаются ближе к пользователю, на границу сети, что значительно сокращает задержку. Это особенно важно для таких сценариев, как умные города или промышленный IoT, где датчики и устройства должны обрабатывать данные в реальном времени. Однако периферийные вычисления сталкиваются с проблемой «эффекта островов» – разрозненности ресурсов, что ограничивает вычислительную мощность и координацию между периферийными узлами.

Самой современной разработкой в этой области является CPN, идея которой была предложена в 2019 г. [5]. Сеть представляет собой качественно новый подход, объединяющий распределенные вычислительные ресурсы в единую сеть с возможностью их динамической координации. Это достигается за счет технологии маршрутизации вычислительных мощностей, которая позволяет оптимально распределять задачи между вычислительными узлами. В результате CPN обеспечивает

ультранизкую задержку и высокую вычислительную мощность, что делает ее идеальным решением для таких передовых областей, как интернет транспортных средств (IoV, *аббр. от англ. Internet of Vehicles*). Однако внедрение CPN требует значительных инвестиций в модернизацию сетевого оборудования, что пока сдерживает ее широкое распространение. Сравнение различных вычислительных парадигм приведено в таблице 1 [8].

ТАБЛИЦА 1. Характеристики различных вычислительных парадигм

TABLE 1. Characteristics of Different Computing Paradigms

Характеристика	Облачные вычисления	Периферийные (граничные) вычисления	Сеть вычислительных мощностей CPN
Год предложения	2006	2014	2019
Основная идея	Предоставление вычислительных услуг из облачного центра	Размещение вычислительных ресурсов на границе сети	Соединение и координация распределенных вычислительных ресурсов через сеть
Сотрудничество между узлами	Нет	Нет	Да
Задержка	Высокая	Низкая	Сверхнизкая
Вычислительная мощность	Высокая	Ограниченная	Высокая
Взаимная осведомленность узлов	Нет	Ограниченная	Высокая
Ключевые технологии	Виртуализация	Выгрузка вычислений	Маршрутизация вычислительной мощности
Сценарии применения	Облачные вычислительные платформы	IoT	IoV
Недостатки	Сеть – узкое место	Эффект изолированности вычислительной мощности	Высокая стоимость модернизации сетевого оборудования

Таким образом, каждая из этих технологий занимает свою нишу в современной IT-инфраструктуре. Облачные вычисления остаются универсальным инструментом для многих задач, периферийные (граничные) вычисления обеспечивают эффективные решения для IoT, а CPN открывает новые горизонты для приложений, требующих максимальной скорости передачи и обработки данных и координации вычислительных ресурсов. Эволюция от централизованных облачных систем к распределенным интеллектуальным вычислительным сетям отражает растущие потребности цифровой экономики и технологический прогресс в области вычислений.

Базовые принципы CPN

Концепция CPN основывается на аналогии между распределением вычислительных ресурсов и электрической энергии в энергосистемах. Основопологающей идеей CPN является представление вычислительных мощностей как «вычислительной энергии», которая может передаваться, накапливаться и потребляться в распределенной сети узлов – аналогично тому, как электрическая энергия распределяется между генераторами, подстанциями и потребителями в энергосетях.

Первоначально концепцию CPN предложила китайская компания Huawei [5] как часть своего видения развития вычислительной инфраструктуры и сетей, подкрепляемое конкретными технологическими решениями и фирменными продуктами.

Цель CPN – создать интеллектуальную интегрированную систему вычислений и сетей, которая управляет и распределяет вычислительные ресурсы («Compute Power») так же легко и эффективно, как традиционные сети связи распределяют пакеты данных. Это позволит предоставить пользователям гибкие и масштабируемые ресурсы для выполнения вычислительных задач, оптимизируя использование имеющихся вычислительных мощностей. Основная идея CPN позиционируется как сеть для интеллектуальной эпохи, где спрос на распределенные вычисления (особенно с развитием ИИ и IoT) будет колоссальным. Ее ключевая задача – глобально объединить разрозненные вычислительные ресурсы (в облаках, на границе сети, в дата-центрах) в единый, легко управляемый и доступный «пул» вычислений. Сеть при этом играет роль не просто транспортной «трубы», а интеллектуальной системы распределения и оркестрации, которая динамически направляет задачи к лучшим доступным вычислительным ресурсам на основе их загруженности, стоимости, задержки и энергопотребления.

CPN охватывает распределение, управление и оптимизацию вычислительных ресурсов в рамках единой сетевой инфраструктуры. Эта сеть позволяет интегрировать различные вычислительные ресурсы (серверы, хранилища данных, вычислительные платформы и др.) и устройства передачи данных (коммутаторы, маршрутизаторы, каналы связи) в единую сеть для предоставления вычислительных мощностей по запросу пользователей услуг CPN, обеспечивая более эффективную эксплуатацию ресурсов и поддержку разнообразных приложений, от облачных и туманных вычислений до IoT.

CPN обеспечивает совместное планирование вычислительных и сетевых ресурсов, направляя задачи различных приложений на оптимальные вычислительные узлы по наиболее подходящим

маршрутам. По мере развития прикладных сценариев особенно важным критерием становится своевременность – один из основных параметров качества обслуживания (QoS, *аббр. от англ. Quality of Service*). В условиях появления задач, требующих высокой вычислительной мощности и обладающих строгими временными ограничениями, критически важными становятся как высокая производительность, так и гарантированная низкая задержка передачи. В этом контексте детерминированные сети [20] представляют собой перспективный путь, обеспечивая стабильные и надежные каналы связи, а также поддержку междоменных сценариев планирования вычислительных задач и передачи данных.

Один из главных принципов CPN – децентрализованное управление ресурсами. Вместо централизованного диспетчерского контроля распределение задач и ресурсов осуществляется на основе самоорганизующихся механизмов, при которых каждый узел в сети способен самостоятельно оценивать свою нагрузку, принимать решения о передаче или приеме задач и участвовать в глобальном балансе нагрузки. Это позволяет достичь высокой адаптивности и масштабируемости системы.

Другим важным принципом является адаптивное и динамическое распределение вычислительных мощностей. Используемые в CPN интеллектуальные алгоритмы, включая методы предиктивной аналитики и машинного обучения, позволяют прогнозировать нагрузку, определять приоритеты задач и оптимально перераспределять ресурсы в реальном времени. В отличие от традиционных подходов, где ресурсы статически закрепляются за задачами или узлами, CPN обеспечивает гибкое перераспределение в зависимости от текущего состояния системы и сетевых условий.

CPN также реализует принцип энергоэффективности. Путем мониторинга использования ресурсов и динамического масштабирования вычислений (например, временного отключения или переключения узлов при снижении нагрузки) достигается минимизация энергопотребления при сохранении требуемого уровня производительности.

Дополнительным принципом является интеграция разнородных вычислительных сред – от мощных облачных дата-центров до периферийных и мобильных устройств. CPN обеспечивает унифицированное управление такими гетерогенными компонентами, абстрагируя различия в архитектуре, пропускной способности и вычислительном потенциале за счет стандартизированного протокола обмена данными и механизмов виртуализации ресурсов.

Наконец, важным аспектом является обеспечение QoS и устойчивости системы. В рамках CPN реализуются приоритетные очереди обработки, допускается избыточность выполнения критических

задач, а также поддерживается автоматическое восстановление после отказов отдельных узлов. Все эти механизмы направлены на обеспечение непрерывности вычислительного процесса в условиях ограниченных и нестабильных ресурсов.

Таким образом, можно отметить следующие преимущества CPN по сравнению с облачными и периферийными (граничными) вычислениями:

- масштабируемость (легкость в добавлении новых ресурсов по мере роста потребностей);
- гибкость (возможность быстро адаптироваться к изменениям в требованиях к вычислительным мощностям);
- экономия затрат (оптимизация использования вычислительных ресурсов может привести к снижению затрат на инфраструктуру);
- устойчивость (возможность распределения нагрузки и резервирования ресурсов повышает надежность вычислительной системы).

Структура CPN

CPN представляет собой сложную распределенную систему, архитектура которой строится на трех фундаментальных компонентах, каждый из которых выполняет критически важные функции для обеспечения эффективной работы всей инфраструктуры [1].

Первым и главным компонентом CPN являются вычислительные узлы, которые образуют физическую основу и представляют собой разнородные вычислительные устройства, распределенные географически. В их состав входят не только традиционные серверные фермы и дата-центры, но и периферийные вычислительные устройства, включая оборудование базовых станций мобильных сетей, промышленные серверы и даже пользовательские устройства с избыточными вычислительными ресурсами. CPN-узлы поддерживают многоуровневую виртуализацию ресурсов, позволяя одновременно работать виртуальным машинам, контейнерам. Каждый узел оснащается специализированным программным обеспечением, которое обеспечивает интеграцию в общую сеть, предоставляя информацию о доступных ресурсах (процессорных мощностях, объемах памяти, хранилищах данных, специализированных ускорителях типа GPU или TPU), текущей загрузке и поддерживаемых сервисах. Особенностью CPN-узлов является их способность динамически формировать пулы ресурсов, где физическое расположение оборудования становится прозрачным для конечных пользователей. Современные реализации таких узлов включают механизмы аппаратного ускорения для обработки сетевого трафика и специализированные интерфейсы для взаимодействия с оркестраторами ресурсов.

Второй компонент CPN – сетевая инфраструктура, представляет собой многоуровневую систему коммуникаций, обеспечивающую надежную и высокоскоростную связь между распределенными узлами. Она включает как традиционные IP-сети, так и специализированные каналы связи, оптимизированные для передачи больших объемов данных с минимальными задержками. Современные реализации используют технологии программно-конфигурируемых сетей (SDN, *аббр. от англ. Software Defined Networking*) [21], которые позволяют динамически управлять маршрутизацией трафика в зависимости от текущей нагрузки и требований услуг. Особое внимание уделяется качеству обслуживания трафика – сетевые компоненты CPN поддерживают механизмы приоритизации трафика, резервирования полосы пропускания и гарантированной задержки. Это реализуется с использованием технологии сетей, чувствительных ко времени (TSN, *аббр. от англ. Time Sensitive Networking*), обеспечивающих гарантированные задержку и надежность доставки информации [22]. В сетевой инфраструктуре CPN применяются инновационные подходы к маршрутизации, учитывающие не только топологию сети, но и доступность вычислительных ресурсов в различных точках присутствия. Для глобальных CPN критически важным становится взаимодействие между сетями разных операторов, что требует реализации стандартизированных интерфейсов и протоколов обмена информацией о доступных ресурсах. Развитие технологий мобильных сетей поколения 5G и перспективных сетей 6G открывает новые возможности для интеграции мобильных устройств в CPN, создавая единое пространство распределенных вычислений.

Третий компонент – управляющие системы, являются «мозгом» CPN, обеспечивающим координацию всех компонентов и предоставление услуг конечным пользователям. Эти системы построены по распределенной архитектуре и включают несколько функциональных уровней. Базовый уровень отвечает за обнаружение и каталогизацию доступных ресурсов, собирая информацию со всех узлов сети в реальном времени. Над ним работает планировщик задач, который принимает решения о размещении рабочих нагрузок с учетом множества факторов: географической близости к источнику данных, требований к задержкам, стоимости использования ресурсов и специальных требований к оборудованию. Современные системы управления CPN применяют методы машинного обучения для прогнозирования нагрузки и превентивного перераспределения ресурсов. Отдельный комплекс компонентов отвечает за безопасность – включая аутентификацию и авторизацию пользователей, шифрование данных, контроль целостности и защиту от DDoS-атак. Важной особенностью

управляющих систем CPN является поддержка мультиарендности, позволяющая одновременно обслуживать множество независимых пользователей с гарантией изоляции их данных и процессов. Перспективным направлением развития технологии CPN является увеличение ее автономности, где рутинные операции распределения вычислительных ресурсов делегируются интеллектуальным алгоритмам, а человеческие ресурсы задействуются только в исключительных ситуациях.

Структура CPN определена в Рекомендации МСЭ-T Y.2501 [1] и включает в себя потребителя услуг, провайдера услуг, платформу транзакций, плоскость управления, оператора сети связи, платформу на базе ИИ (рисунок 2).

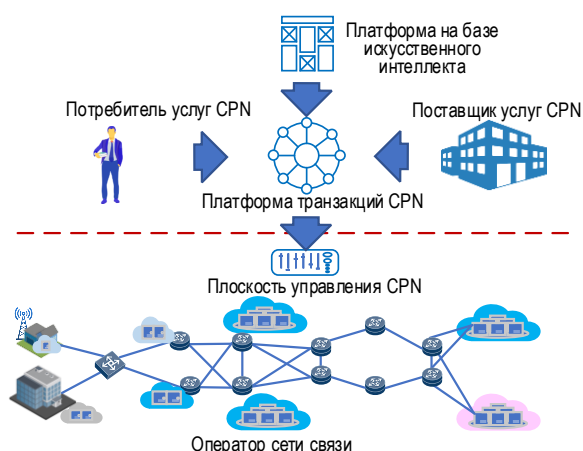


Рис. 2. Структура сети вычислительных мощностей (источник: МСЭ-T)

Fig. 2. Computing Power Network Framework (Source: ITU-T)

Структура CPN построена с учетом взаимодействия различных участников и элементов, обеспечивающих эффективное распределение и использование вычислительных и сетевых ресурсов. Ключевыми участниками в этой архитектуре выступают потребители услуг, поставщики вычислительной мощности, операторы сетей связи, а также управляющие и транзакционные платформы.

Потребитель услуг CPN – это как физические, так и юридические лица, использующие вычислительные и сетевые ресурсы для реализации собственных сервисов и приложений. Они могут предъявлять различные требования, в зависимости от специфики их задач: кому-то важна высокая производительность, другим – минимальная стоимость или строгие требования к безопасности.

Поставщиком (провайдером) услуг CPN являются организации или физические лица, предоставляющие свои вычислительные ресурсы (вычислительные узлы, хранилища данных, мощности для обработки задач) в рамках распределенной сети. Сетевое взаимодействие и передачу данных между узлами обеспечивают операторы связи, выступающие в роли провайдеров сетевой инфра-

структуры. Их вычислительные ресурсы могут представлять собой как небольшие периферийные узлы, так и более масштабные облачные центры обработки данных, либо даже суперкомпьютерные комплексы. Таким образом, к поставщикам услуг CPN могут относиться телекоммуникационные операторы, крупные облачные платформы, малые и средние предприятия, научные центры или отдельные пользователи, обладающие вычислительными мощностями.

Платформа транзакций в CPN служит посредником между потребителями и поставщиками вычислительных ресурсов. Она обеспечивает процесс обмена ресурсами, который может осуществляться как в открытом, так и в анонимном режиме. В первом случае потребители точно знают, от какого поставщика поступают вычислительные ресурсы. Во втором – данные о поставщике скрыты, а ответственность за безопасность вычислений и корректность транзакции лежит на самой платформе. При этом платформа должна учитывать не только характеристики вычислительных ресурсов, но и сетевые параметры, обеспечивая согласованное распределение ресурсов в соответствии с географическим расположением и техническими требованиями к обслуживанию.

Плоскость управления CPN играет ключевую роль в сборе и агрегации информации о доступных ресурсах. Она фиксирует данные о вычислительной мощности, сетевых характеристиках и текущем состоянии инфраструктуры, передает эту информацию на транзакционную платформу, где она используется для подбора оптимального ресурса. Благодаря этому потребители CPN получают возможность выбирать ресурсы, которые наилучшим образом соответствуют их требованиям по задержке, пропускной способности или стоимости, и подключаться к ним наиболее рациональным способом.

Сетевой оператор в архитектуре CPN выполняет функции по предоставлению соединений между пользователями и вычислительными ресурсами. Он может варьировать качество и уровень сетевого обслуживания в зависимости от требований потребителя. Такой оператор обеспечивает гибкость сети, позволяя формировать маршруты с заданными параметрами QoS, что особенно критично для приложений с временной чувствительностью.

Платформа с поддержкой искусственного интеллекта – дополнительный модуль в архитектуре CPN. Она предоставляет интеллектуальные сервисы потребителям, например, автоматическую адаптацию вычислительной мощности под текущую нагрузку, а также может помогать поставщикам услуг CPN в оптимизации распределения ресурсов или прогнозировании спроса.

Функциональная архитектура CPN

Функциональная архитектура CPN (рисунок 3) приведена в Рекомендации МСЭ-Т Y.2501 [1] и представляет собой многоуровневую систему, в которой каждый уровень выполняет специфические функции, обеспечивая целостную работу распределенной вычислительной сети. Такая структура позволяет достичь модульности, гибкости, масштабируемости и высокой степени адаптации к различным условиям эксплуатации. Всего в архитектуре CPN выделяют четыре ключевых уровня: услуг, управления, ресурсов, а также оркестровки и эксплуатационного управления. Их взаимодействие обеспечивает реализацию ключевых функций системы: от динамического планирования вычислительных ресурсов до обеспечения устойчивого и масштабируемого соединения между пользователями и вычислительными узлами.

Верхним является уровень услуг CPN, который выполняет роль внешнего интерфейса между системой и ее пользователями – как частными, так и корпоративными. Через этот уровень осуществляется подача запросов на вычисления, формулировка требований к QoS и безопасности, а также определение параметров соглашения о QoS (SLA, аббр. от англ. Service Level Agreement). Здесь также реализуются функции учета, тарификации, мониторинга и отчетности. Уровень услуг позволяет пользователям взаимодействовать с CPN через удобные интерфейсы, не вдаваясь в технические подробности функционирования внутренней инфраструктуры.

Следующим является уровень управления CPN, выполняющий функции интеллектуального центра системы. Здесь происходит обработка поступающих

с уровня услуг запросов, трансляция пользовательских требований в технические параметры, планирование распределения ресурсов, а также принятие решений о маршрутизации задач, приоритезации вычислений и контроле соблюдения SLA. Уровень управления использует алгоритмы оптимизации и предиктивной аналитики, позволяющие адаптивно реагировать на изменение нагрузки, прогнозировать пиковые состояния и эффективно перераспределять ресурсы между узлами сети. Он обеспечивает системную согласованность между потребностями пользователей и возможностями вычислительной инфраструктуры.

Уровень ресурсов в архитектуре CPN представляет собой основу, на которой размещаются все вычислительные и сетевые ресурсы, предоставляемые различными участниками экосистемы – от поставщиков вычислительной мощности до сетевых операторов. Именно на этом уровне сосредоточены ключевые компоненты инфраструктуры, включая облачные платформы, вычислительные узлы, пограничные (Edge) системы и другие элементы, обеспечивающие выполнение вычислительных задач и передачу данных; используются соответствующие вычислительные ресурсы, такие как серверы различной производительности и назначения, сетевые компоненты, включая коммутаторы, маршрутизаторы и другое сетевое оборудование для маршрутизации трафика, а также локальные и распределенные ресурсы хранения данных. Кроме того, сюда входят предварительно развернутые сервисы и приложения, работающие на вычислительных узлах и обеспечивающие выполнение задач пользователей.

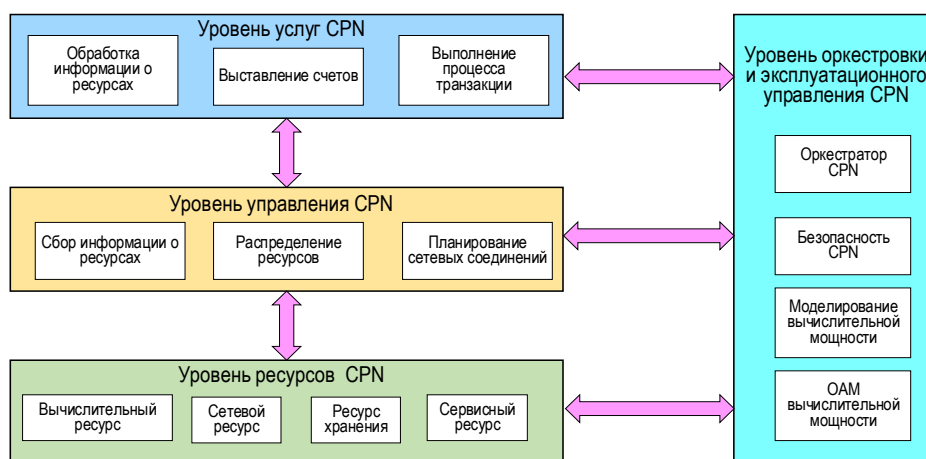


Рис. 3. Функциональная архитектура CPN (источник: МСЭ-Т)

Fig. 3. CPN Functional Architecture (Source: ITU-T)

Связующим звеном между логикой управления и физической реализацией служит уровень оркестровки и эксплуатационного управления CPN. Его назначение связано с технической координацией

всех процессов внутри системы. На этом уровне осуществляется развертывание вычислительных задач, масштабирование, конфигурирование ре-

сурсов, управление жизненным циклом контейнеров и виртуальных машин, обеспечение отказоустойчивости, безопасности и контроля доступа. Оркестрация обеспечивает выполнение стратегических решений, принятых на уровне управления, и гарантирует стабильную, синхронизированную работу всех компонентов сети. Также сюда входят функции автоматического восстановления, мониторинга состояния компонентов, логирования событий и централизованного управления обновлениями и политиками.

В совокупности все четыре уровня обеспечивают полнофункциональную работу CPN как единой, согласованной системы, способной адаптироваться к изменяющимся условиям, рационально распределять ресурсы и обеспечивать заданный уровень обслуживания даже в условиях высокой нагрузки или ограниченной инфраструктуры. Взаимодействие между уровнями организовано по принципу нисходящей и восходящей передачи информации: от пользовательского запроса через планирование и оркестрацию – к физическому выполнению задачи, и далее – к возврату результатов и аналитических данных в управляющие модули системы.

Принципы работы CPN

Для технической реализации CPN предполагается использовать [6]:

- концепт IPv6+, который предоставляет расширенные возможности для интеллектуального управления сетью, гарантированной полосы пропускания и задержки (например, с помощью технологий сегментной маршрутизации SRv6, сетевого программирования Network Programming и др.);
- единый протокол для описания и запроса вычислительных ресурсов;
- глобальный «мозг» (система управления и оркестрации), который имеет полное представление обо всех сетевых и вычислительных ресурсах.

Рассмотрим принципы работы CPN на примере ее реализации с использованием трех ключевых компонент: платформы транзакций CPN, контроллера CPN и шлюзов CPN (рисунок 4) [7]. Платформа транзакций находится на уровне услуг в архитектуре CPN (см. рисунок 3) и реализует процесс транзакции (выделения) необходимой вычислительной мощности.

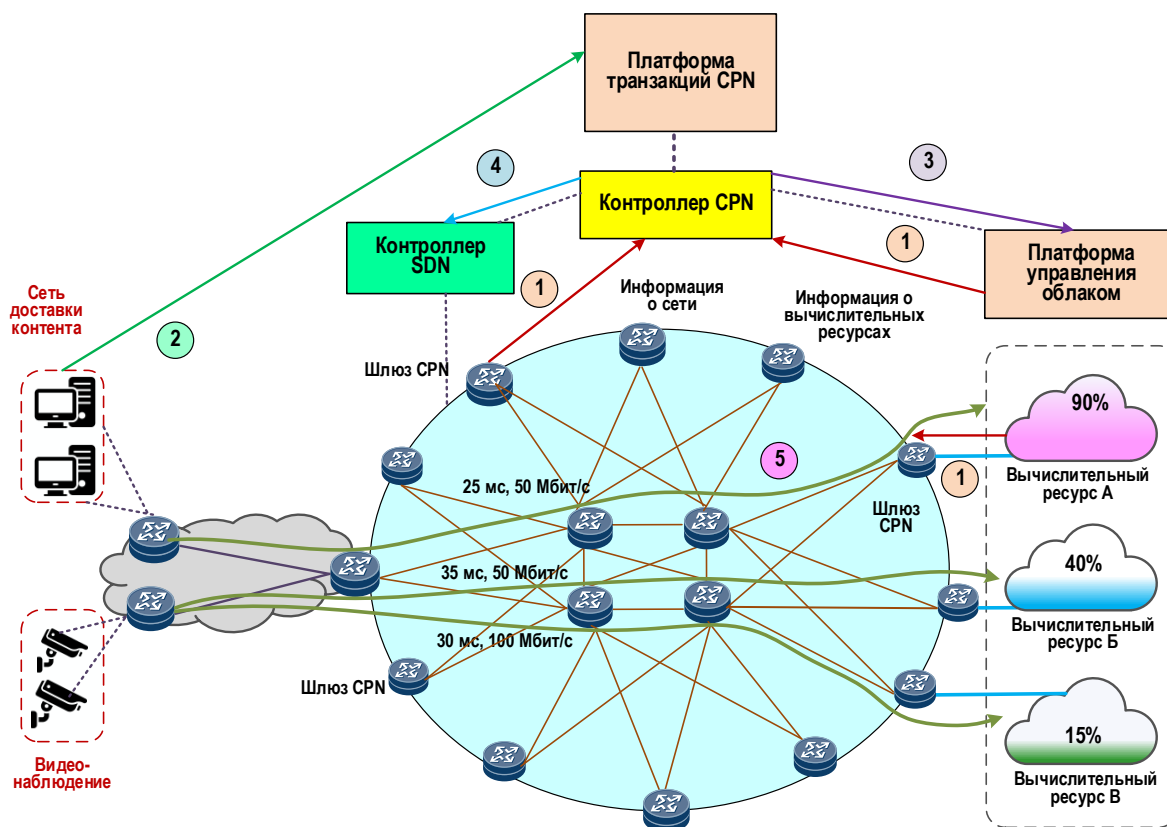


Рис. 4. Этапы реализации услуг CPN

Fig. 4. Stages of CPN Service Implementation

Контроллер CPN реализует функции уровня управления CPN и выполняет сбор, анализ и обработку информации о вычислительных мощностях

и сетевой инфраструктуре. В данном решении контроллер CPN взаимодействует с платформами управления облаком и сетью на базе контроллера

SDN. Взаимодействие контроллеров CPN и SDN происходит через прикладные программные интерфейсы (API, аббр. от англ. Application Programming Interface) и протоколы, позволяющие контроллеру CPN координировать сетевые и вычислительные ресурсы. Так, через северный API SDN-контроллер предоставляет REST API для контроллера CPN, позволяя запрашивать сетевые изменения на основе вычислительной нагрузки (например, перенаправление трафика к граничным серверам), а через южный интерфейс программировать сетевые устройства, интегрированные с CPN-ресурсами (например, маршрутизация трафика к вычислительным узлам) с использованием протоколов OpenFlow или P4. Шлюз CPN размещается на выходе из пула вычислительных ресурсов для реализации обмена и распределения информации о ресурсах вычислительной мощности, формирования отчетов и взаимодействия с платформой транзакций и контроллером для завершения всего процесса предоставления услуг CPN. Шлюз CPN может в различной степени разгружать функции платформы управления облаком и платформы управления сетью в зависимости от используемого решения.

Процесс функционирования рассматриваемой CPN включает пять этапов (обозначены стрелками с цифрами на рисунок 4) [10].

Этап 1. Пулы вычислительных ресурсов (например, дата-центры) регулярно отправляют информацию о наличии доступных ресурсов на шлюзы вычислительной мощности. Контроллер CPN собирает глобальную информацию о вычислительных ресурсах (типы процессоров, их производительность, емкость хранилищ и др.) со шлюзов через платформу управления облаком, а информацию о сетевых ресурсах (связность узлов, пропускная способность каналов, задержки между узлами и др.) – с сетевых узлов через контроллер SDN, а затем после обработки отправляет ее на платформу транзакций CPN.

Этап 2. Пользователи услуг CPN отправляют запросы на требуемые вычислительные ресурсы на платформу транзакций CPN, и выбирают сами, или платформа транзакций рекомендует подходящие ресурсы в соответствии с их потребностями. Платформа анализирует, какие ресурсы нужны, насколько важна скорость передачи информации и сколько данных потребуется передавать. Исходя из этого, она автоматически подбирает лучшие вычислительные и сетевые ресурсы. Например, если нужно минимизировать задержки, платформа транзакций CPN выберет ближайший и менее загруженный узел с быстрым соединением. Если важна большая пропускная способность, она выберет более широкополосный канал, даже если он находится дальше.

Этап 3. В зависимости от статуса транзакции между пользователем и поставщиками услуг CPN на платформе транзакций, контроллер CPN отправляет соответствующую стратегию распределения вычислительных средств каждому пулу ресурсов, например, уведомляет поставщиков о том, сколько и каких вычислительных мощностей будет занято в течение определенного периода времени, при этом одновременно обновляются данные о ресурсах, зарегистрированных платформой транзакций CPN.

Этап 4. В соответствии с распределением сетевых ресурсов платформа управления сетью (контроллер SDN) получает требования к сетевому соединению, такие как тип соединения, которое необходимо установить, и параметры качества обслуживания трафика QoS. На основе этих требований устанавливаются соответствующие соединения в телекоммуникационной сети для реализации услуги CPN.

Этап 5. Реализация бизнес-услуги CPN для пользователя.

В результате выполнения всех этапов пользователь получает доступ к выбранным вычислительным ресурсам для решения собственных задач. Таким образом, CPN обеспечивает в реальном времени выбор оптимальных вычислительных мощностей и маршрутов передачи данных в зависимости от текущей загрузки вычислительных ресурсов, полосы пропускания и задержки в сети связи и требований пользователя.

Данный подход к предоставлению услуг CPN вполне реализуем на существующих облачных платформах. Для этого нужно только обеспечить работу и взаимодействие различных систем управления – например, объединить управление облаком и сетью. В рассмотренной архитектуре шлюз вычислительной мощности в основном собирает и передает информацию, но в будущем его можно сделать более автономным, чтобы он мог самостоятельно выполнять часть функций управления CPN.

В CPN важную роль играет метод оценки возможностей вычислительных ресурсов. С одной стороны, однотипные вычислительные ресурсы должны быть унифицированы в одной единице измерения. С другой стороны, для комплексного отражения возможностей поддержки услуг CPN могут использоваться определенные значения интегрированных индексов. Рассмотрим пример, иллюстрирующий, как строится модель вычислительных ресурсов и как поддерживается генерация таблицы маршрутизации [23]. Как показано на рисунке 5, существуют два пула вычислительных ресурсов, предоставляющих услуги CPN, и пользователь получает доступ к услуге через маршрутизатор R1.

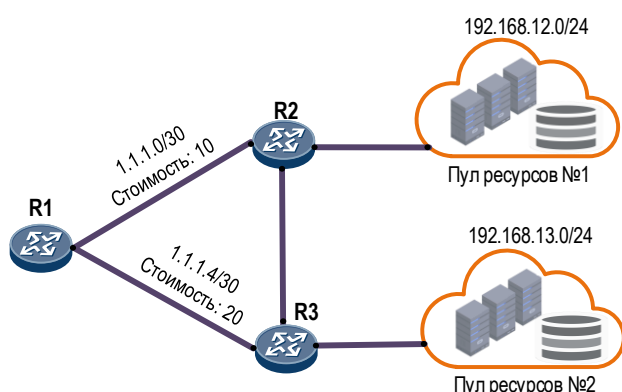


Рис. 5. Пример сетевой топологии CPN

Fig. 5. An Example CPN Network Topology

Традиционно следующий узел в IP-сети выбирается в соответствии с имеющимися сетевыми ресурсами путем анализа таблицы маршрутизации, которая для маршрутизатора R1 показана в таблице 2. В ней переход к узлу R3 имеет большую сетевую стоимость, которая может учитывать доступную полосу пропускания, задержку и другие характеристики IP-сети, поэтому трафик будет направлен к этому узлу.

В сети CPN шлюз вычислительной мощности получает информацию о доступных вычислительных ресурсах, таких как мощность центрального процессора (например, 2,4 ГГц), мощность графического процессора (например, 100 терафлопс), объем оперативной памяти (например, 256 Гбайт) и др. На основе полученной информации оценивается загрузка центрального процессора (например, 40 %), загрузка графического процессора (например, 60 %), загрузка оперативной памяти (например, 35 %) и другие факторы. Интегральный параметр в виде стоимости вычислительной мощности записывается в таблице маршрутизации, которая для R1 представлена в таблице 3.

Так как требуемая услуга CPN может быть реализована в обоих пулах вычислительных ресурсов, узел R1 анализирует стоимость вычислительной мощности и сетевую стоимость для выбора подходящего следующего перехода. В рассматриваемом примере сетевая стоимость у переходов одинаковая, поэтому с точки зрения стоимости вычислительной мощности узел R2 более эффективен. Следовательно, трафик пользователя будет направлен на R2 для доступа к требуемой вычислительной услуге.

ТАБЛИЦА 2. Таблица маршрутизации R1

TABLE 2. Routing Table of R1

IP-адрес назначения	Протокол	Приоритет	Сетевая стоимость	Флаг	Следующий переход	Интерфейс
192.168.12.0/24	IS-IS	15	10	D	1.1.1.2	GE0/0/1
192.168.13.0/24	IS-IS	15	20	D	1.1.1.6	GE0/0/2

ТАБЛИЦА 3. Таблица маршрутизации R1, включающая параметр вычислительной мощности

TABLE 3. Routing Table of R1 Including Computing Power Parameter

IP-адрес назначения	Протокол	Приоритет	Стоимость вычислительной мощности	Сетевая стоимость	Флаг	Следующий переход	Интерфейс
192.168.12.0/24	IS-IS	15	10	10	D	1.1.1.2	GE0/0/1
192.168.13.0/24	IS-IS	15	20	10	D	1.1.1.6	GE0/0/2

Стандартизация CPN

Концепция CPN находится на стыке нескольких областей и ее стандартизацией занимается не один орган, а скорее экосистема организаций, каждая из которых работает над стандартизацией ключевых компонентов этой концепции. Ключевую координирующую роль в этом процессе играет Китай, в частности через национальную ассоциацию телекоммуникационных стандартов (CCSA, аббр. от англ. China Communications Standards Association) и Международный союз электросвязи (МСЭ), при активном лидерстве компании Huawei. На текущем этапе можно наблюдать первоначальное формирование нормативной базы, которая должна обеспечить совместимость и эффективное функционирование этой перспективной технологии в глобальном масштабе.

Первоначально в 2019 г. в Инженерном совете Интернета IETF была создана исследовательская группа COINRG (COmputing In Network Research Group), работа которой посвящена изучению глубокой интеграции вычислений и сетей. В документах группы используется термин «вычисления в сети» (Computing in the Network), который означает, что сетевые инфраструктуры будут не только пересылать данные, но и иметь возможности вычислений. Рабочая группа подготовила несколько проектов документов (таблица 4), в которых определяется терминология в области CPN, направления дальнейших исследований, варианты практического применения.

ТАБЛИЦА 4. Документы исследовательской группы COINRG IETF

TABLE 4. COINRG IETF Study Group Documents

Год	Название документа	Статус документа
2024	Варианты использования вычислений в сети	Активный интернет-проект
	Анализ вариантов использования вычислений в сети	Просроченный интернет-проект
2023	Направления исследований вычислений в сети	Просроченный интернет-проект
	Терминология для вычислений в сети	Просроченный интернет-проект

Ключевую роль в разработке основополагающих стандартов для CPN играет сектор стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), в рамках которого в 2021 г. была открыта новая серия Рекомендаций Y.25xx, специально посвященная CPN (таблица 5). Начало этому процессу положила рекомендация Y.2501, которая стала первым международным документом, описывающим общую архитектуру вычислительных сетей. В документах МСЭ-Т заложены концептуальные основы и базовые принципы организации CPN, включая структуру, функциональную архитектуру, эталонную модель интерфейсов, требования к системе сигнализации и методы управления распределенными вычислительными ресурсами.

Параллельно с развитием базового стандарта в рамках МСЭ-Т ведется работа над рядом дополнительных рекомендаций, призванных детализировать отдельные аспекты функционирования CPN. В частности, проект Q.CPN фокусируется на архитектуре сигнализации, определяя процедуры управления ресурсами и информационные потоки, необходимые для развертывания сервисов. Другой важный документ – Q.BNG-INC – посвящен стандартизации требований к интеллектуальному управлению пограничными сетевыми шлюзами, что особенно актуально для сценариев, предполагающих взаимодействие между облачными и периферийными вычислительными ресурсами.

Особого внимания заслуживает разрабатываемая рекомендация Y.ASA-CPN, которая вводит стандартизированные подходы к аутентификации и планированию вычислительных ресурсов в распределенных сетях. Этот документ призван решить одну из ключевых проблем CPN – обеспечение доверенного взаимодействия между разнородными узлами сети. В нем рассматриваются механизмы управления ресурсами, методы унифицированного планирования и система идентификации вычислительных мощностей, что имеет принципиальное значение для создания безопасной и надежной инфраструктуры.

ТАБЛИЦА 5. Документы МСЭ-Т по стандартизации CPN

TABLE 5. ITU-T CPN Standardization Documents

Документ (год)	Название документа	Статус документа
ITU-T Y.2501 (2021)	Сеть вычислительных мощностей – Структура и архитектура	Рекомендация
ITU-T Y.2502 (2024)	Сеть вычислительных мощностей – Архитектура аутентификации и оркестровки	Проект рекомендации
ITU-T Q.4140 (2023)	Требования к сигнализации для предоставления услуг в CPN	Рекомендация
ITU-T Q.4141 (2023)	Требования и сигнализация интеллектуального управления для пограничного сетевого шлюза в CPN	Рекомендация
ITU-T Q.4142 (2024)	Архитектура сигнализации для оркестровки услуг в CPN	Рекомендация
ITU-T Q.4143 (2024)	Требования к сигнализации для плоскости управления на основе облака и объединенной плоскости пользователя виртуализированного шлюза широкополосной сети (vBNG)	Рекомендация
ITU-T Q.4144 (2025)	Требования к сигнализации для межоператорской оркестровки услуг в CPN	Рекомендация
ITU-T Q.CPN-TP-SA	Архитектура сигнализации транзакционной платформы CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.NGNe-O CPN-reqts (2025)	Требования и структура усовершенствований оркестровки NGNe для поддержки CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.ASA-CPN (2021)	Архитектура планирования аутентификации в CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.SFO (2021)	Требования и структура оркестровки сервисных функций на основе цепочки сервисных функций	Проект рекомендации
ITU-T Q.CPN-GW-IBN (2024)	Сигнализация и процедура интеллектуального управления шлюзом вычислительной мощности в CPN с использованием сети на основе намерений	Проект рекомендации
ITU-T Q.CPN-NC-SA (2023)	Архитектура сигнализации функций управления сетью для CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.CPN-CL-Arch (2025)	Требования и архитектура уровня управления CPN для сетевых ресурсов в NGNe	Проект рекомендации
ITU-T Y.CPN-DF (2025)	Сеть вычислительных мощностей – Термины и определения	Проект рекомендации
ITU-T Y.CPN-exp-reqts (2025)	Требования к раскрытию возможностей в CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.CPN-gcpm (2026)	Функциональные требования к моделированию вычислительной мощности в CPN	Проект рекомендации
ITU-T Y.CPN-TP-Arch (2026)	Требования и функциональная архитектура платформы транзакций CPN	Проект рекомендации

Помимо МСЭ-Т, значительный вклад в стандартизацию CPN вносят и другие международные организации. Европейский институт телекоммуникационных стандартов (ETSI) развивает концепцию периферийных (граничных) вычислений в мобильных сетях 4G / 5G с мультимедийным доступом (MEC, *аббр. от англ. Multi-access Edge Computing*), которая во многом перекликается с идеями CPN, особенно в части распределения вычислительных ресурсов на границе сети. Проблемами совершенствования протоколов маршрутизации и управления ресурсами, которые могут быть адаптированы для нужд вычислительных сетей, занимается Инженерный совет интернета (IETF). Особую активность проявляет консорциум 3GPP, который исследует возможности интеграции CPN с инфраструктурой мобильной связи нового поколения 6G, что открывает перспективы для реализации сценариев с ультранизкой задержкой.

Несмотря на очевидный прогресс в области стандартизации, процесс формирования нормативной базы для CPN сталкивается с рядом существенных вызовов. Одной из основных проблем остается фрагментация инициатив – отсутствие единой согласованной системы стандартов может серьезно затруднить глобальное внедрение технологии. Кроме того, успешная реализация концепции CPN требует беспрецедентного уровня координации между поставщиками сетевых и облачных услуг, что отмечается в рекомендациях МСЭ-Т. Технологическая сложность самой концепции, предполагающей динамическое распределение ресурсов при обеспечении безопасности и совместимости с существующей инфраструктурой, также представляет собой серьезное препятствие для разработчиков стандартов.

Перспективы дальнейшего развития стандартизации CPN связаны с разработкой единого подхода к описанию архитектуры, интерфейсов и протоколов взаимодействия, который бы учитывал как специфику распределенных вычислений, так и требования современных телекоммуникационных сетей. Особое внимание следует уделить вопросам безопасности, управления QoS и механизмам оркестрации ресурсов. Решение этих задач позволит превратить CPN из перспективной концепции в универсальную платформу, способную обеспечить новый уровень эффективности распределенных вычислений.

Таким образом, процесс стандартизации CPN находится на важном этапе своего развития. Уже сейчас можно говорить о формировании концептуальных основ, заложенных в рекомендациях МСЭ-Т, однако предстоит еще значительная работа по созданию комплексной системы стандартов, которая бы охватывала все аспекты функционирования вычислительных сетей. Успех этой работы во многом

будет зависеть от степени координации между международными организациями, производителями оборудования и операторами связи, а также от способности выработать согласованные подходы к решению сложных технологических задач.

Сценарии применения CPN

Сети вычислительных мощностей работают в основном в двух типах сценариев. Первый тип – это сценарии с низкой задержкой, реализуемые с использованием периферийных (граничных) вычислений. В этом случае CPN обеспечивает координацию между вычислительными ресурсами различных периферийных облаков. Второй тип – это сценарии высокой мобильности, в этом случае CPN обеспечивает гибкое планирование для предоставления вычислительных услуг пользователям, перемещающимся по значительной территории, например, «живая» видеотрансляция при путешествиях или коммуникации автомобиля с любыми объектами (V2X, *аббр. от англ. Vehicle-to-Everything*). Далее приведены примеры таких типовых сценариев использования CPN.

Сценарий переключения периферийных облаков [24]

Для обеспечения низкой задержки при периферийных вычислениях требуется взаимодействие вычислительных и сетевых возможностей. Низкая задержка является одной из наиболее важных характеристик периферийных вычислений, а также ключевым фактором, отличающим их от облачных вычислений. В сценарии периферийных вычислений клиенты остро нуждаются в низкой задержке, высоких вычислительных возможностях и сетевой маршрутизации, которые уже выходят за рамки возможностей традиционных поставщиков облачных услуг. Таким образом, в дополнение к развертыванию вычислительных узлов на границе сети также требуется реконструкция архитектуры базовой сети по принципу «вычислительно-сетевой взаимодействия».

Вычислительная задача, требующая низкой задержки связи, может быть заранее распределена в ближайшее периферийное облако платформой транзакций CPN. Потребителями такого сценария могут быть устройства IoT, пользователи мобильных устройств, беспилотные автомобили и т. д. При нехватке вычислительной мощности периферийного облака шлюзы CPN, подключенные к вычислительному узлу, должны распределять вычислительную мощность между доменами. Процесс переключения периферийных облаков на примере нехватки вычислительной мощности в облаке 1 (рис. 6) включает перечисленные ниже процедуры планирования.

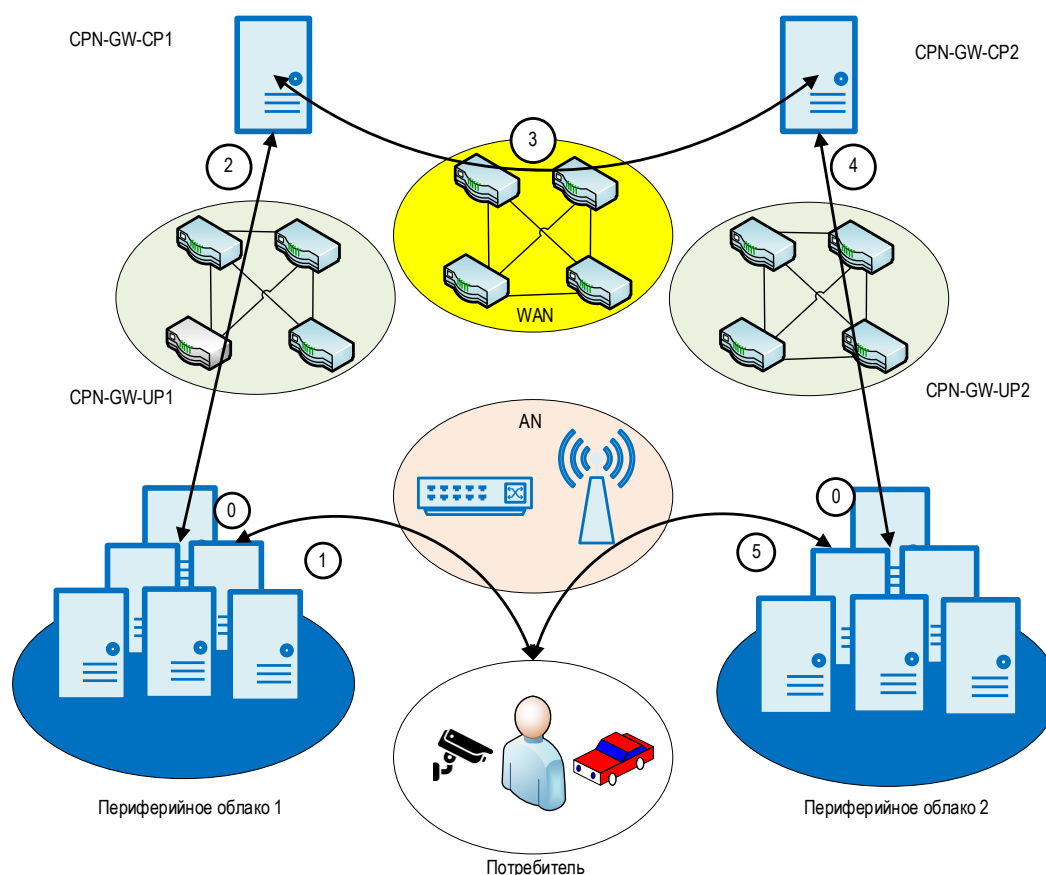


Рис. 6. Сценарий переключения периферийных облаков

Fig. 6. Edge Cloud Switchover Scenario

Процедура 0. Информация о вычислительных ресурсах и производительности сети в периферийном облаке передается в плоскость управления шлюза CPN, а таблица информации о внутридоменных ресурсах поддерживается функцией сбора информации о ресурсах. Соседние шлюзы плоскости управления CPN-GW-CP1 и CPN-GW-CP2 будут обмениваться данными для поддержания таблицы информации о междоменных ресурсах.

Процедуры 1 и 2. Потребители отправляют вычислительную задачу на периферийное облако 1, однако вычислительной мощности в нем недостаточно. Запрос на междоменное планирование вычислительной мощности будет отправлен на подключенный шлюз CPN-GW-CP1.

Процедура 3. В соответствии с таблицей информации о междоменных ресурсах шлюз CPN-GW-CP1 выбирает периферийное облако 2 для выполнения разгрузки вычислений и отправляет к нему вычислительную задачу.

Процедура 4. Шлюз CPN-GW-CP2 обращается к таблице информации о внутридоменных ресурсах и выделяет необходимую вычислительную мощность для задачи. Затем будет установлено сетевое соединение для удовлетворения сетевых требований задачи.

Процедура 5. Потребители будут уведомлены об изменении вычислительного узла и отправят данные на серверы, развернутые в периферийном облаке 2. Вычислительные задачи будут решены и их результаты возвращены потребителям.

Сценарий переключения дата-центров [24].

В сценарии переключения центров обработки данных (рисунок 7), в отличие от сценария переключения узлов периферийных вычислений, плоскость управления сетью разделена на две части. Первая часть – это междоменный контроллер глобальной вычислительной сети WAN, который управляет трафиком между вычислительными доменами. Вторая часть – это внутридоменная плоскость управления шлюзами CPN, которая управляет трафиком внутри домена. Таким образом, в этом сценарии междоменная вычислительная мощность планируется централизованно и реализуется с помощью следующих процедур.

Процедура 0. Плоскость управления шлюза CPN собирает информацию о внутридоменных вычислительных ресурсах и сетевых характеристиках и хранит ее в соответствующей таблице.

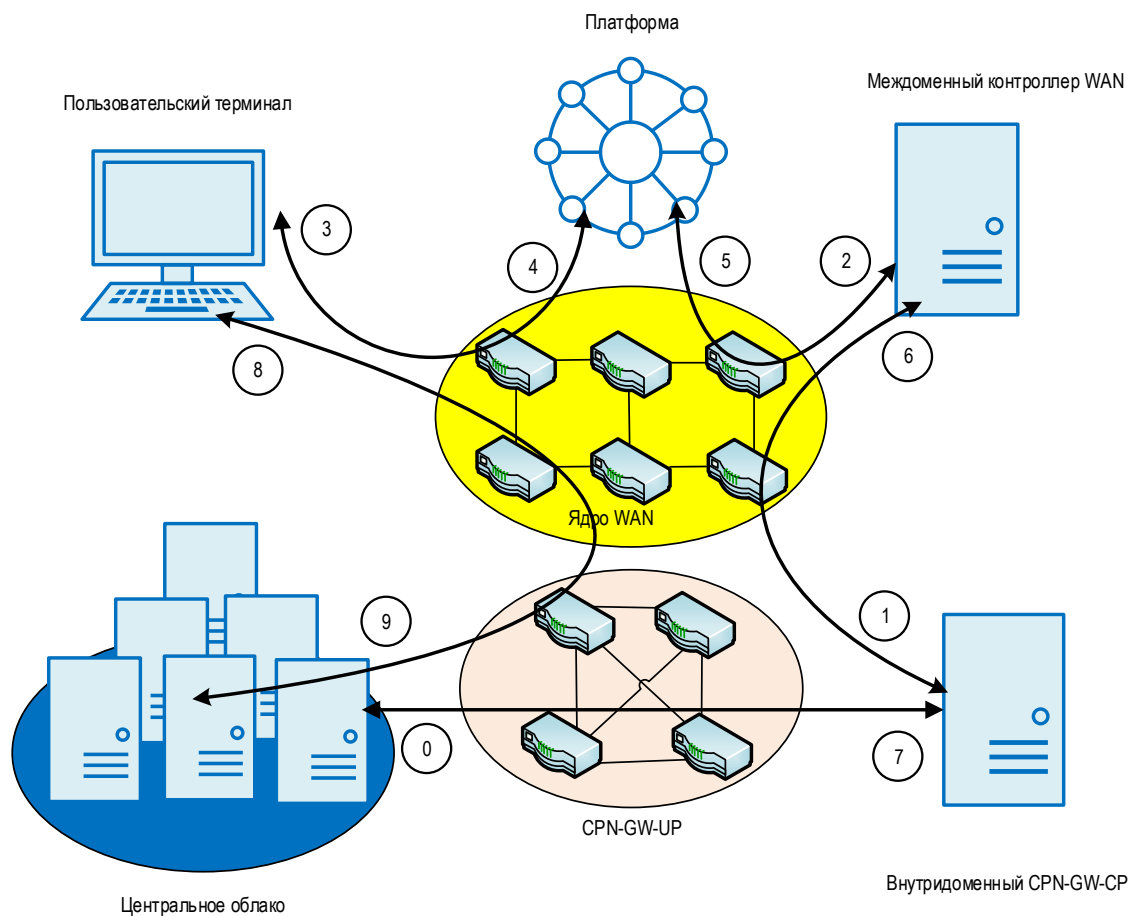


Рис. 7. Сценарий переключения дата-центров

Fig. 7. Data Centre Interconnect Scenario

Процедура 1. Таблица информации о внутридоменных ресурсах отправляется в междоменный контроллер WAN, который поддерживает таблицу междоменных ресурсов, содержащую данные о вычислительных мощностях и характеристиках сети.

Процедура 2. Таблица информации о междоменных ресурсах отправляется в платформу транзакций CPN, которая интегрирует данные о ресурсах всей сети и формирует соответствующие квоты ресурсов.

Процедуры 3 и 4. Когда пользовательский терминал запрашивает ресурсы для вычислительной задачи, запрос отправляется в платформу. Платформа передает информацию об имеющихся ресурсах пользователю, который выбирает наиболее подходящие и заключают договор транзакции с провайдером услуг CPN.

Процедура 5. Платформа отправляет информацию о транзакции в междоменный контроллер WAN. Контроллер обращается к таблице информации о междоменных ресурсах, выделяет их для транзакции, а затем создает и поддерживает сетевое соединение между пользователем и выбранным центром обработки данных.

Процедура 6. Транзакция доставляется в контроллер внутридоменного шлюза CPN.

Процедура 7. На основе таблицы информации о внутридоменных ресурсах выделяются необходимые ресурсы локально контроллером внутридоменного шлюза CPN, а также устанавливается и поддерживается сетевое соединение между ресурсами и потребителями.

Процедуры 8 и 9. Терминал пользователя отправляет вычислительную задачу серверу, который выполняет ее и возвращает результаты обработки.

Сценарий высокой мобильности [1]

Такие сервисы, как «живая» трансляция при путешествиях и коммуникации автомобиля со всем (V2X), часто отличаются высокой мобильностью пользователя. Так, в примере сценария «живой» трансляции ведущий ведет прямую трансляцию путешествия из города А в город Б и по пути должен демонстрировать окрестности. Услуги «живой» трансляции должны обеспечивать отображение окружающего фона, взаимодействие с аудиторией в режиме реального времени (например, голосовую и видеосвязь, прямой эфир и т. д.). В будущем для «живой» трансляции виртуальной реальности

потребуется более качественная визуализация, большая вычислительная мощность и меньшая задержка. Поскольку местоположение ведущего постоянно меняется, при использовании одних и тех же вычислительных ресурсов это изменение будет увеличиваться, как и физическое расстояние между пользователем и вычислительными ресурсами, что приведет к увеличению задержки. Следовательно, CPN может выбирать соответствующие вычислительные и сетевые ресурсы для пользователей в режиме реального времени на основе местоположения и ресурсных условий, чтобы улучшить взаимодействие с пользователем.

Заключение

Сеть вычислительных мощностей CPN предлагает ряд существенных преимуществ, особенно в условиях стремительного роста потребностей в вычислительных ресурсах. Одним из главных достоинств является высокая гибкость – пользователи могут получать доступ к вычислительной мощности по мере надобности, без необходимости инвестировать в дорогостоящее оборудование. Это снижает барьеры для входа в высокотехнологичные области, такие как ИИ, анализ больших данных. Кроме того, благодаря распределенной архитектуре CPN может повышать устойчивость системы в целом – сбой одного узла не приводит к остановке всей сети, поскольку задачи перераспределяются. В некоторых реализациях используется геораспределенность, что позволяет обрабатывать данные ближе к источнику их возникновения (например, на границе сети), снижая задержки и улучшая производительность.

Еще одним плюсом можно назвать более эффективное использование ресурсов – простаивающие вычислительные мощности (например, в нерабочие часы) могут быть задействованы для решения сторонних задач, что повышает общий КПД всей инфраструктуры. В случаях, когда CPN интегрирована с блокчейном, появляется прозрачная система

учета и мотивации – участники получают вознаграждение за предоставление ресурсов, что стимулирует рост сети и делает ее самоподдерживающейся.

Однако, несмотря на очевидные плюсы, у CPN есть и ряд существенных недостатков. Во-первых, обеспечение безопасности и конфиденциальности данных в распределенной среде представляет собой сложную задачу. Поскольку данные могут обрабатываться на множестве узлов, в том числе на устройствах с непроверенной надежностью, возникает риск утечки или компрометации информации. Во-вторых, проблемы с совместимостью оборудования, программного обеспечения и стандартов взаимодействия между различными узлами могут затруднить интеграцию и снизить эффективность всей системы. Также стоит учитывать, что высокая степень децентрализации может привести к неоптимальной маршрутизации задач, особенно если отсутствует качественная система балансировки нагрузки в сети.

Кроме того, несмотря на потенциальную экономию, реальная стоимость использования CPN может варьироваться в зависимости от доступности ресурсов, сетевых условий и спроса. В сценариях, где требуется гарантированное время отклика или высокая надежность, распределенная сеть может уступать централизованным решениям. Также следует отметить, что для полноценного функционирования CPN требуется развитая сетевая инфраструктура и высокоскоростной интернет, что не всегда возможно в удаленных или слаборазвитых регионах.

Таким образом, CPN представляет собой мощную и перспективную модель распределенных вычислений, способную значительно расширить доступ к ресурсам и повысить эффективность их использования, но при этом требует продуманных решений в сфере безопасности, стандартизации и управления.

Список источников

1. Rec. ITU-T Y.2501. Computing Power Network – framework and architecture. 2021.
2. Смелянский Р.Л. Эволюция вычислительной инфраструктуры // Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2024. № 4. С. 190–233. DOI:10.55959/MSU/01370782152024474190234. EDN:OZHXTV
3. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degrees Compared // Proceedings of the Grid Computing Environment Workshop (Austin, USA, 12–16 November 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GCE.2008.4738445
4. Duan Q. Service-Oriented Network Virtualization for Composition of Cloud Computing and Networking // International Journal of Next-Generation Computing. 2011. Vol. 2. Iss. 2. PP. 123–138.
5. Huawei Technology Report. Computing 2030. Tech. Rep., 4. 2023. https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/intelligent_world_2030_en.pdf
6. Lei B., Liu Z., Wang X., Yang M., Chen Y. Computing network: A new multiaccess edge computing // Telecommunications Science. 2019. Vol. 35. Iss. 9. PP. 44–51.
7. Yukun S., Bo L., Junlin L., Haonan H., Xing Z., Jing P. Computing power network: A survey // China Communications. 2024. Vol. 21. Iss. 9. PP. 109–145. DOI:10.23919/JCC.ja.2021-0776
8. Zhao Q., Lei B., Wei M. Survey of computing power network // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. 2022. Vol. 3. Iss. 3. PP. 632–644. DOI:10.52953/BXBJ6384. EDN:WJMMIH

9. Jia Q., Hu Y., Zhou X., Ma Q., Guo K., Zhang H., Xie R., Huang T., Liu Y. Deterministic Computing Power Networking: Architecture, Technologies and Prospects // arXiv:2401.17812. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2401.17812
10. Lei B., Zhao Q., Mei J. Computing Power Network: An Interworking Architecture of Computing and Network Based on IP Extension // Proceedings of the 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR, Paris, France, 07–10 June 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/HPSR52026.2021.9481792
11. Li S., Li T., Zhou X. Computing Power Network: A Network-Centric Supply Paradigm for Integrated Resources // ZTE Technology Journal. 2021. Vol. 27. Iss. 3. PP. 29–34. DOI:10.12142/ZTETJ.202103007
12. Tang X., Cao C., Wang Y., Zhang S., Liu Y., Li M., et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement // China Communications. 2021. Vol. 18. Iss. 2. PP. 175–185. DOI:10.23919/JCC.2021.02.011. EDN:FDUIVB
13. Cao C., Zhang S., Liu Y., Tang X. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration // Telecommunications Science. 2020. Vol. 36. Iss. 07. PP. 55–62.
14. Lei B., Wang J., Zhao Q., Yu Y., Yang M. Novel network virtualization architecture based on the convergence of computing, storage and transport resources // Telecommunications Science. 2020. Vol. 36. Iss. 7. PP. 42–54.
15. Liu J., Sun Y., Su J., Li Z., Zhang X., Lei B., et al. Computing Power Network: A Testbed and Applications with Edge Intelligence // Proceedings of the Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS, New York, USA, 02–05 May 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798112.
16. Smeliansky R. Network Powered by computing: Next generation of computational infrastructure // Edge Computing – Technology, Management and Integration. Iss. IntechOpen. 2023. PP. 47–70. DOI:10.5772/intechopen.110178
17. Smeliansky R. Network Powered by Computing // Proceedings of the International Conference on Modern Network Technologies (MoNeTec, Moscow, Russian Federation, 27–29 October 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/MoNeTec55448.2022.9960771
18. Глушак Е.В. Облачные и туманные вычисления: архитектура, моделирование, применение. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 180 с. EDN:BUZGWB
19. Росляков А.В., Ванышин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю. Интернет вещей. Самара: ПГУТИ, 2014. 342 с.
20. Росляков А.В., Герасимов В.В. Детерминированные сети связи и их стандартизация // Стандарты и качество. 2024. № 7. С. 42–47. DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN: UTBDXB
21. Ефименко А.А., Федосеев С.В. Организация инфраструктуры облачных вычислений на основе SDN сети // Экономика, статистика и экономика. Вестник УМО. 2013. № 5. С. 185–187. EDN:RPFQDD
22. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53. DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
23. Rec. ITU-T Q.4140. Protocols and signalling for computing power networks. Signalling requirements for service deployment in computing power networks. 2023.
24. Rec. ITU-T Q.4141. Protocols and signalling for computing power networks. Requirements and signalling of intelligence control for the border network gateway in computing power networks. 2023.

References

1. Rec. ITU-T Y.2501. *Computing Power Network – framework and architecture*. 2021.
2. Smelyansky R.L. Evolution of the computing infrastructure. *Bulletin of Moscow University. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*. 2024;4:190–233. (in Russ.) DOI:10.55959/MSU/01370782152024474190234. EDN:OZHXTV
3. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degrees Compared. *Proceedings of the Grid Computing Environment Workshop, 12–16 November 2008, Austin, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GCE.2008.4738445
4. Duan Q. Service-Oriented Network Virtualization for Composition of Cloud Computing and Networking. *International Journal of Next-Generation Computing*. 2011;2(2):123–138.
5. Huawei Technology Report. *Computing 2030*. 2023. https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/intelligent_world_2030_en.pdf
6. Lei B., Liu Z., Wang X., Yang M., Chen Y. Computing network: A new multiaccess edge computing. *Telecommunications Science*. 2019;35(9):44–51.
7. Yukun S., Bo L., Junlin L., Haonan H., Xing Z., Jing P. Computing power network: A survey. *China Communications*. 2024; 21(9):109–145. DOI:10.23919/JCC.ja.2021-0776
8. Zhao Q., Lei B., Wei M. Survey of computing power network. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*. 2022;3(3): 632–644. DOI:10.52953/BXBj6384. EDN:WJMMIH
9. Jia Q., Hu Y., Zhou X., Ma Q., Guo K., Zhang H., Xie R., Huang T., Liu Y. Deterministic Computing Power Networking: Architecture, Technologies and Prospects. *arXiv:2401.17812*. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2401.17812
10. Lei B., Zhao Q., Mei J. Computing Power Network: An Interworking Architecture of Computing and Network Based on IP Extension. *Proceedings of the 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing, HPSR, 07–10 June 2021, Paris, France*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/HPSR52026.2021.9481792
11. Li S., Li T., Zhou X. Computing Power Network: A Network-Centric Supply Paradigm for Integrated Resources. *ZTE Technology Journal*. 2021;27(3):29–34. DOI:10.12142/ZTETJ.202103007
12. Tang X., Cao C., Wang Y., Zhang S., Liu Y., Li M., et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement. *China Communications*. 2021;18(2):175–185. DOI:10.23919/JCC.2021.02.01.1. EDN:FDUIVB
13. Cao C., Zhang S., Liu Y., Tang X. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration. *Telecommunications Science*. 2020;36(7):55–62.

14. Lei B., Wang J., Zhao Q., Yu Y., Yang M. Novel network virtualization architecture based on the convergence of computing, storage and transport resources. *Telecommunications Science*. 2020;36(7):42–54.
15. Liu J., Sun Y., Su J., Li Z., Zhang X., Lei B., et al. Computing Power Network: A Testbed and Applications with Edge Intelligence. *Proceedings of the Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS, 02–05 May 2022, New York, USA*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798112
16. Smeliansky R. Network powered by computing: Next generation of computational infrastructure. *Edge Computing – Technology, Management and Integration. IntechOpen*. 2023. p.47–70. DOI:10.5772/intechopen.110178
17. Smeliansky R. Network Powered by Computing. *Proceedings of the International Conference on Modern Network Technologies, MoNeTec, 27–29 October 2022, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/MoNeTec55448.2022.9960771
18. Glushak E.V. *Cloud and fog computing: architecture, modeling, application*. Moscow, Vologda: Infra-Engineering Publ.; 2025. 180 p. (in Rus.) EDN:BUZGWB
19. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu., Samsonov M.Yu. *Internet of Things*. Samara: PSUTI Publ.; 2014. 342 p. (in Rus.)
20. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Deterministic networks and their standardization. *Standards and Quality*. 2024;7:42–47. (in Rus.) DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN:UTBDXB
21. Efimenko A.A., Fedoseev S.V. Organization of cloud computing infrastructure based on SDN network. *Statistics and Economics*. 2013;5:185–187. (in Rus.) EDN:RPFQDD
22. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E. Standardization of time-synchronized TSN networks. *Standards and Quality*. 2021;4:48–53. (in Rus.) DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53
23. Rec. ITU-T Q.4140. *Protocols and signalling for computing power networks. Signalling requirements for service deployment in computing power networks*. 2023.
24. Rec. ITU-T Q.4141. *Protocols and signalling for computing power networks. Requirements and signalling of intelligence control for the border network gateway in computing power networks*. 2023.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 09.10.2025.

Информация об авторах:

РОСЛЯКОВ
Александр Владимирович

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

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

АЛЕКСАХИН
Павел Алексеевич

аспирант кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0005-1979-4992>

МИХАЙЛОВ
Валерий Андреевич

инженер кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0002-0028-3402>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов, аспирантов и их руководителей



ПКМ 2025

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗВИТИЕ ЦИФРОВЫХ КЛАСТЕРОВ В РОССИИ И МИРЕ

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ:



Инфокоммуникационные
сети и системы



Кибербезопасность



Гуманитарные, экономические и экологические
проблемы цифрового общества



Радиоэлектронные системы
и робототехника



Информационные технологии
и программная инженерия



Круглый стол
«Инновации для Арктики»



РЕГИСТРАЦИЯ ДО 20 НОЯБРЯ

PKM.SUT.RU

9–11 ДЕКАБРЯ

План издания научной литературы 2025 г., п. 12

Усл.-печ. л.
18,25

Формат
60×84_{1/8}

Заказ
№ 1631

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

E-mail: tuzs@sut.ru Web: tuzs.sut.ru VK: vk.com/spbtuzs

