

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

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

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблшер"

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

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

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2025

Адрес редакции и издателя

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

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

Тел.: +7 (495) 957-77-43

Адрес типографии

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

Индексация журнала:

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

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

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

Media Registration Certificate

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

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

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

© "Media Publisher", 2025

Editorial and Publisher Address

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

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

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна
ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович

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

Бестугин Александр Роеальдович

(д.т.н., профессор ГУАП), Россия

Вааль Альберт

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

Варламов Олег Витальевич

(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Гребенников Андрей Викторович

(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

Данилов Владимир Григорьевич

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

Дулкейтс Эрик

(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

Елизаров Андрей Альбертович

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

Ибрагимов Байрам

(д.т.н., профессор Азербайджанского технического университета, АзТУ), Азербайджан

Корбетт Ровэлл

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

Кузовкова Татьяна Алексеевна

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

Лазарева Галина Геннадьевна

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

Лернер Илья Михайлович

(д.т.н., КНИТУ-КАИ), Россия

Ныркв Анатолий Павлович

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

Омельянов Георгий Александрович

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

Самойлов Александр Георгиевич

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

Сысоев Николай Николаевич

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

Чиров Денис Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шарп Майкл

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

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Джиган В.И.

Сравнительная эффективность цифровых предсказателей сигналов на базе адаптивных рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов

4

**Иванов В.А., Иванов Д.А., Рябова Н.В.,
Конкин Н.А., Чернов А.А.**

Сенсорная диагностика ионосферных КВ радиолоний и сетевые подходы к передаче полученной информации

15

Вересова А.М., Тюрликов А.М., Богатырев В.А.

Оценка корректирующей способности конструкций на основе блочных матриц при исправлении пакетов ошибок

23

СВЯЗЬ

Рачугин Р.О.

Анализ вариантов возврата от 2-шаговой к 4-шаговой процедуре случайного доступа

33

Мелихов Е.О., Строганова Е.П.

Многоадресная рассылка мультимедийного контента и адресная доставка в мобильных сетях 4G/5G: методы эффективного использования частотного спектра и расчет зоны покрытия

41

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФОРМАТИКА

Макаров В.С., Терентьев А.В., Акиншин Н.С., Юдин Д.А.

Оптимизация трудозатрат при реализации проектов импортозамещения на основе нейросетевых алгоритмов

51

ТРАНСПОРТ

**Карелина М.Ю., Ключев Р.В., Терентьев А.В., Кутков В.Д.,
Акиншин Н.С., Сердечный Д.В.**

Подходы к оптимизации жизненного цикла арктической транспортной техники

58

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Djigan V.I.**
Comparative Efficiency of Signal Digital Predistorters Based on Adaptive Recursive Least Squares Algorithms 4
- Ivanov V.A., Ivanov D.A., Ryabova N.V., Konkin N.A., Chernov A.A.**
Sensor diagnostics of ionospheric short-wave radio lines and network approaches to transmitting received information 15
- Veresova A.M., Turlikov A.M., Bogatyrev V.A.**
Estimation of burst error correcting capability for code constructions based on matrices from blocks 23

COMMUNICATIONS

- Rachugin R.O.**
Analysis types of backoff from 2-step to 4-step random access procedure 33
- Melikhov E.O., Stroganova E.P.**
Multicast of multimedia content and targeted distribution in 4G / 5G mobile networks: frequency spectrum optimizing methods and coverage area calculating 41

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMPUTER SCIENCE

- Makarov V.S., Terentyev A.V., Akinshin N.S., Yudin D.A.**
Optimization of labor inputs in import substitution projects using neural network algorithms 51

TRANSPORT

- Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Terentyev A.V., Kutkov V.D., Akinshin N.S., Serdechnyy D.V.**
Approaches to optimizing the life cycle of arctic transport equipment 58

T - C o m m

Telecommunications and transport
Volume 19. No. 11-2025

Release date: 25.11.2025

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

Founder: "Media Publisher", Ltd.

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

Editor in Chief: Dr. Valery O. Tikhvinskiy

Editorial board

- Artem S. Adzhemov**
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia
- Alexander P. Anyutin**
Doctor of sciences, Professor, member of the program and organizing committee WSEAS, Russia, Mexico
- Aleksandr R. Bestugin**
Doctor of sciences, Professor SUAI, Russia
- Corbett Rowell**
Full Professor: Electronic & Electrical Engineering
Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA
- Denis S. Chirov**
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
- Vladimir G. Danilov**
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia
- Eric Dulkeyts**
Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA
- Julius Golovachyov**
Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany
- Andrey Grebennikov**
Ph.D., Sumitomo Electric Europe, United Kingdom
- Bayram Ibrahimov**
Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU), Azerbaijan
- Tatyana A. Kuzovkova**
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
- Galina G. Lazareva**
Corresponding Member, RAS, Doctor of sciences, Professor RAS, RUDN, Russia
- Ilya M. Lerner**
Doctor of sciences, KNRTU-KAI, Russia
- Anatoliy P. Nyrkov**
Doctor of sciences, Professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russia
- Georgii A. Omel'yanov**
Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, Mexico
- Alexander G. Samoilov**
Doctor of sciences, VLSU, Russia
- Michael Sharpe**
PhD, European Standards Institute – ETSI, United Kingdom
- Sergey S. Shavrin**
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
- Nikolai N. Sysoev**
Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University Lomonosov, Russia
- Oleg V. Varlamov**
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
- Albert Waal**
Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany
- Marina V. Yashina**
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia
- Andrey A. Yelizarov**
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ПРЕДИСКАЗИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ АДАПТИВНЫХ РЕКУРСИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-4-14

Manuscript received 17 August 2025;
Accepted 20 October 2025

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ "Курчатовский Институт

Джиган Виктор Иванович,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия;
Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва, Россия
dzhigan_vi@nrcki.ru

Ключевые слова: Цифровые предисказаторы (Digital Predistorters, DPD) сигналов, усилители мощности, адаптивные рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов, DPD с непрямым обучением, DPD с прямым обучением, традиционная архитектура, модифицированная архитектура

Цифровое предискажение сигналов сегодня широко используется в радиопередающих устройствах систем связи. Оно позволяет выравнивать так называемые амплитудно-амплитудные и амплитудно-фазовые модуляционные характеристики (АМ-АМ и АМ-ФМ) нелинейных усилителей мощности (УМ). Выравнивание происходит за счет такого предискажения сигналов, поступающих на вход УМ, что результирующие АМ-АМ и АМ-ФМ характеристики каскадного соединения цифровой предискажитель (Digital Predistorter, DPD) и нелинейный УМ линеаризуются. Как следствие, в выходном сигнале УМ уменьшаются внеполосные искажения, что приводит к увеличению его полезной выходной мощности и к устранению искажений передаваемых информационных символов. DPD является адаптивным устройством. Существует два типа DPD: с непрямым и с прямым обучением. На практике в большинстве случаев применяются адаптивные DPD с непрямым обучением. В таких DPD можно использовать адаптивные фильтры как на основе простых алгоритмов градиентной спуска, так и на основе более сложных, но и более эффективных, рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS). В традиционных же DPD с прямым обучением RLS-алгоритмы использовать невозможно, однако их можно использовать в так называемых модифицированных DPD. В работе рассмотрены архитектуры DPD и их математические модели при использовании в них адаптивных фильтров на основе RLS-алгоритмов. Сравнительная эффективность рассматриваемых DPD демонстрируется путем компьютерного моделирования. В качестве УМ используется его модель с памятью. Нелинейный DPD моделируется многоканальным линейным адаптивным фильтром, каналы которого соответствуют усеченным диагональным ядрам нечетных порядков фильтра Вольтера. Глубина памяти (число элементов задержки в каждом из каналов) такого фильтра равна удвоенной глубине памяти модели УМ. Весовые коэффициенты адаптивных фильтров вычисляются с помощью RLS-алгоритмов в обоих DPD. Установлено, что при использовании линейного ядра и усеченных диагональных ядер третьего, пятого, седьмого и девятого порядков, модифицированный DPD с прямым обучением практически полностью устраняет внеполосные искажения в выходном сигнале УМ. Подавление этих искажений с помощью такого DPD в выходном сигнале рассматриваемого УМ составило около 11.4 дБ, а с помощью DPD с непрямым обучением – около 8.3 дБ. Эти численные показатели, графики спектральных плотностей мощности, а также графики АМ-АМ и АМ-ФМ характеристик демонстрируют функциональное превосходство модифицированного DPD с прямым обучением по сравнению с DPD с непрямым обучением.

Информация об авторе:

Джиган Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела проблем проектирования в микроэлектронике, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"; профессор Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета "Московский институт электронной техники", Москва, Россия.
ORCID 0000-0001-7485-1623

Для цитирования:

Джиган В.И. Сравнительная эффективность цифровых предисказаторов сигналов на базе адаптивных рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 4-14.

For citation:

V.I. Djigan, "Comparative Efficiency of Signal Digital Predistorters Based on Adaptive Recursive Least Squares Algorithms," T-Comm, 2025, vol. 19, no. 11, pp. 4-14. (in Russian)

Введение

Передача сообщений в цифровом виде сегодня широко используется в современных средствах радиосвязи [1]. Однако из-за усилителей мощности (УМ) [2], цифровые сигналы подвергаются заметным нелинейным искажениям, «находясь» еще в радиопередатчике. Эти искажения устраняются с помощью цифровых предискажителей сигналов (Digital Predistorters, DPD) [3-5]. В процессе работы DPD настраивается таким образом, что его нелинейная передаточная функция становится обратной к нелинейной передаточной функции УМ. В результате нелинейный УМ «линеаризуется». Качество линеаризации характеризуется амплитудной и фазовой составляющими этой функции, которые называются амплитудно-амплитудной (АМ-АМ) и амплитудно-фазовой (АМ-ФМ) модуляционными характеристиками.

Ключевым элементом DPD является многоканальный линейный адаптивный фильтр [7, 8], формирующий нелинейную передаточную функцию. Эта функция в большинстве случаев представляется усеченными рядами Вольтера [6]. Корреляционная матрица входных сигналов такого фильтра является плохо обусловленной. Поэтому при использовании вычислительно простых градиентных алгоритмов для расчета весовых коэффициентов (ВК) адаптивного фильтра, такой фильтр медленно сходится. Этому недостатка лишены рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS), включая их быстрые (вычислительно эффективные) версии, что делает эти алгоритмы привлекательным для использования в адаптивных фильтрах DPD. Адаптивные фильтры, использующие RLS-алгоритмы, сходятся быстрее и обеспечивают меньшую среднеквадратичную ошибку (СКО) в установившемся состоянии по сравнению с адаптивными фильтрами, использующими градиентные алгоритмы.

Известны два вида DPD: с непрямым обучением [9] и с прямым обучением [10]. В DPD с непрямым обучением могут быть использованы RLS-алгоритмы, а вот в традиционных DPD с прямым обучением эти алгоритмы использовать нельзя. Они могут быть использованы лишь в так называемых модифицированных версиях DPD с прямым обучением [11].

Целью настоящей работы является описание архитектур и математических моделей DPD с непрямым и прямым обучением для УМ с памятью, а также анализ результатов компьютерного моделирования, подтверждающих работоспособность и сравнительную эффективность этих DPD.

Архитектуры DPD и их математические модели

Рассмотренный в [9] DPD с непрямым обучением предназначен для линеаризации УМ без памяти. В тоже время, УМ без памяти редко встречаются на практике. Они всегда окружены различного рода аналоговыми частотно-избирательными цепями (фильтрами). Поэтому аналоговый четырехполосник в виде УМ и окружающих его фильтров характеризуется групповым временем задержки входного сигнала. В терминах дискретной модели такого четырехполосника, число содержащихся в ней элементов задержки (памяти) называется глубиной памяти. Упрощенная нелинейная модель УМ с памятью обычно представляет собой либо каскадное соединение линейного фильтра и УМ без памяти (модель Винера), либо каскадное соединение УМ без памяти и линейного фильтра (модель Хаммерштейна), либо каскадное соединение УМ без

памяти и линейных фильтров на его входе и выходе (модель Винера-Хаммерштейна) [3-5]. Поэтому в архитектуре DPD с непрямым обучением необходимо учитывать задержку выходного сигнала модели УМ, отсутствующую в [9]. Архитектура такого DPD для УМ с памятью приведена на рисунке 1. Часть, относящаяся собственно к DPD, на рисунке выделена синей пунктирной линией.

Обработка сигналов в DPD выполняется на частоте их дискретизации F_d , которая в несколько раз превышает частоту, характеризующую ширину полосы частот передаваемого сигнала. Отсчеты обрабатываемых сигналов следуют с периодом дискретизации $T_d = 1/F_d$, а номера k этих отсчетов, как правило, совпадают, с номерами итераций алгоритма вычисления ВК адаптивного фильтра. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, осуществляющие дискретизацию сигналов, на рис. 1 и последующих рисунках не показаны. Выходной сигнал УМ $y''(k)$ сначала ослабляется с помощью аттенюатора G_A^{-1} , а затем преобразуется на нулевую промежуточную частоту с помощью широкополосного преобразователя частоты (на рис. 1 не показан), который моделируется «Линией задержки 2», задерживающей этот сигнал на D_2 отсчетов с периодом T_d . Здесь G_A^{-1} – это коэффициент передачи (ослабления) аттенюатора. Предполагается, что преобразователь частоты не вносит искажений, а вносит лишь задержку сигнала.

Как следует из рис. 1, входной сигнал адаптивного фильтра $y'''(k) = y''(k - D_2) + z(k) = y(k) + z(k)$ является зашумленным, где $y(k)$ – это выходной сигнал преобразователя частоты, а $z(k)$ – сигнал суммарного шума УМ и преобразователя частоты. Это является одним из недостатков DPD с непрямым обучением, так как алгоритмы вычисления ВК адаптивных фильтров не предполагают, что входные сигналы этих фильтров содержат шумы [7, 8].

Согласно рис. 1, адаптивный фильтр решает задачу обратной идентификации нелинейного УМ с памятью. Его ВК копируются в нелинейный DPD-фильтр, собственно осуществляющую линеаризацию УМ.

Однако в отличие от линейных четырехполосников, которые коммутативны, нелинейные четырёхполосники (в данном случае DPD в каскаде с УМ и УМ в каскаде с адаптивным фильтром) некоммутивны, что является еще одним из недостатков DPD с непрямым обучением.

На рисунке 1, в качестве требуемого сигнала $\hat{d}(k)$ используется задержанный с помощью «Линии задержки 3» сигнал с выхода DPD-фильтра $\hat{d}(k) = y'(k - D_3)$, где $D_3 = D_{УМ} + D_2$ – это суммарное число элементов задержки УМ с памятью $D_{УМ}$ и преобразователя частоты D_2 .

Вычисление ВК DPD-фильтра осуществляется в процессе минимизации адаптивным фильтром различных функций от сигнала ошибки $\hat{\alpha}(k) = \hat{d}(k) - \hat{y}(k)$, где $\hat{y}(k)$ – это выходной сигнал адаптивного фильтра.

На рисунке 1, «Линия задержки 1» не является составной частью DPD с непрямым обучением. Она используется лишь для определения качества линеаризации УМ путем сравнения передаваемого задержанного сигнала $x(k)$ и зашумленного

сигнала $y'''(k)$ на выходе преобразователя частоты как $\alpha(k) = d(k) - y'''(k)$. Поэтому число элементов задержки сигнала $x(k)$ определяется значением $D_1 = D_{DPD} + D_3$.

Детальная архитектура DPD с непрямым обучением показана на рис. 2. В здесь и далее векторы обозначаются строчными прямыми жирными буквами. Матрицы обозначаются прописными прямыми жирными буквами. Верхний индекс Т в векторах и в матрицах обозначает операцию их транспонирования. Нижний индекс, например N , обозначает число элементов в векторе, а аналогичный индекс в квадратной матрице – число ее элементов, равное $N \times N$. Операция эрмитова сопряжения (транспонирования и комплексного сопряжения элементов вектора или матрицы, обозначаемого верхним индексом *) обозначается верхним индексом Н.

Сигнал на выходе DPD-фильтра вычисляется как

$$y'(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{x}_N(k),$$

где $\mathbf{h}_N(k)$ – это вектор ВК, а $\mathbf{x}_N(k)$ – вектор задержанных отсчетов сигнала $x(k)$ в этом фильтре.

Аналогично вычисляется сигнал на выходе адаптивного фильтра

$$\hat{y}(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{y}_N'''(k),$$

где $\mathbf{y}_N'''(k)$ – это вектор задержанных отсчетов сигнала $y'''(k)$ в этом фильтре.

На каждой итерации работы адаптивного фильтра его выходной сигнал $\hat{y}(k)$ формируется при использовании вектора ВК $\mathbf{h}_N(k-1)$, вычисляемого на предыдущей итерации $k-1$, так как этот сигнал используется и при вычислении вектора ВК $\mathbf{h}_N(k)$ на текущей итерации k .

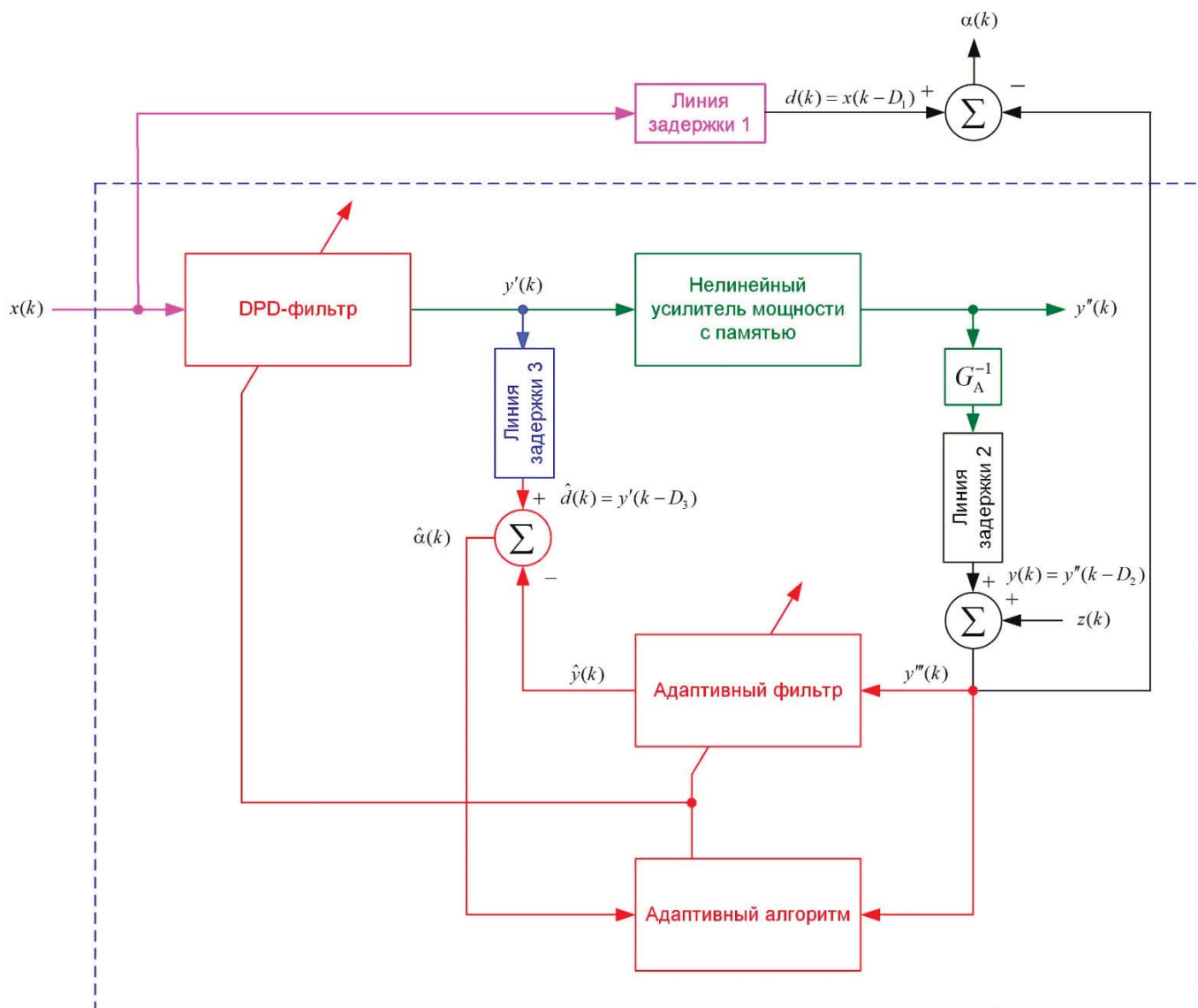


Рис. 1. Обобщенная архитектура DPD с непрямым обучением

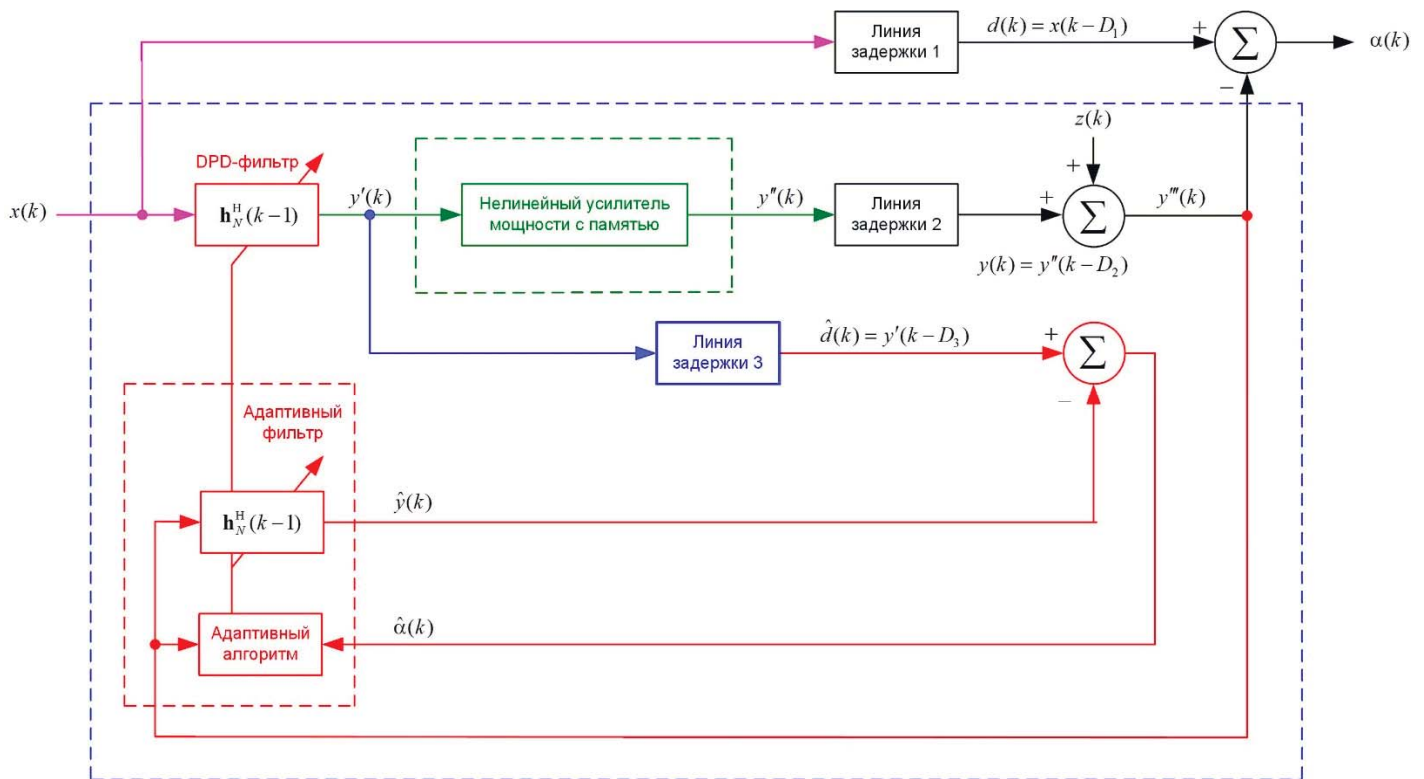


Рис. 2. Детальная архитектура DPD с непрямым обучением

Обобщенная архитектура традиционного DPD с прямым обучением [10] приведена на рис. 3. В ней, в отличие от DPD с непрямым обучением, входным сигналом адаптивного фильтра (он же в этой архитектуре одновременно и DPD-фильтра) и адаптивного алгоритма, вычисляющего ВК, является незашумлённый сигнал $x(k)$. Кроме того, в процессе вычисления ВК используется сигнал $\alpha(k)$, характеризующий, как уже было сказано, качество линейризации УМ.

DPD, рис. 3, может быть использован только для линейризации УМ без памяти. Для линейризации УМ с памятью следует использовать DPD с прямым обучением, рис. 4. Особенностью его архитектуры является наличие «Линии задержки 4», задерживающей входной сигнал $x(k)$ на число отсчётов $D_4 = D_{\text{УМ}} + D_2$. Выходной сигнал линии задержки $x(k - D_4)$ участвует в формировании отсчётов вектора сигнала $\hat{\mathbf{x}}_N(k) = \mathbf{x}_N(k - D_4)$, используемого при вычислении ВК адаптивного фильтра $\mathbf{h}_N(k)$.

Эта задержка необходима по следующей причине. Так как сигнал $y'''(k)$ задерживается относительно сигнала $y'(k)$ на $D_3 = D_{\text{УМ}} + D_2$ отсчётов, то и вектор сигналов, участвующий в вычислении ВК адаптивных фильтров, также должен быть задержан на $D_4 = D_3$ отсчётов, что обеспечивает корректное вычисление этих ВК, использующих сигнал ошибки $\alpha(k) = d(k) - y'''(k)$, формируемый с помощью двух сигналов: задержанного на D_1 отсчётов сигнала $x(k)$, прошедшего через «Линию задержки 1», и задержанного на $D_1 = D_{\text{DPD}} + D_3$

отсчётов этого же сигнала, прошедшего через DPD-фильтр, нелинейный усилитель с памятью и «Линию задержки 2».

Если для вычисления ВК адаптивного фильтра использовать градиентные алгоритмы с шагом сходимости, определяемом числом ВК N [7, 8], то из-за задержки D_1 DPD (рис. 4) будет неустойчивым. В этом DPD требуется использовать уменьшенное значение шага сходимости, предельное значение которого определяется числом $D_1 > N$. В этом случае адаптивный фильтр будет устойчивым, но с уменьшенным шагом он будет сходиться медленно.

К сожалению, в DPD (рис. 4) невозможно использовать более эффективные RLS-алгоритмы, так как в них отсутствует параметр, аналогичный шагу сходимости, регулировка которого могла бы обеспечить устойчивое поведение этих алгоритмов.

В тоже время, RLS-алгоритмы можно использовать в так называемом модифицированном DPD с прямым обучением [11]. Для получения такого DPD применено решение, аналогичное [12], ранее использованное в устройствах активного шумоподавления, где оно доказало свою работоспособность и продемонстрировало функциональную эффективность. Детальная архитектура модифицированного DPD с прямым обучением приведена на рисунке 5.

В этой архитектуре можно использовать не только адаптивные фильтры на основе градиентных алгоритмов, предельный шаг сходимости которых определяется числом ВК адаптивного фильтра N , но и адаптивные фильтры на основе RLS-алгоритмов.

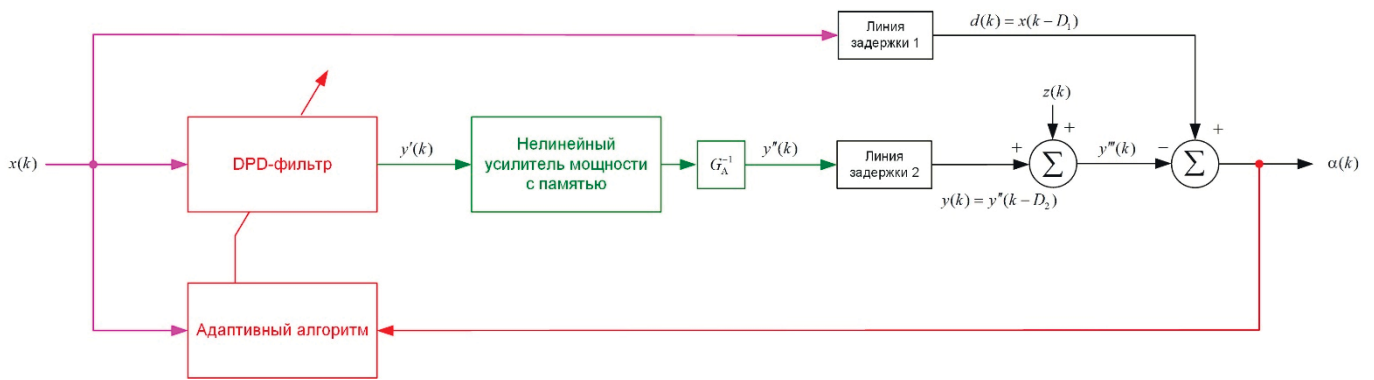


Рис. 3. Обобщенная архитектура традиционного DPD с прямым обучением

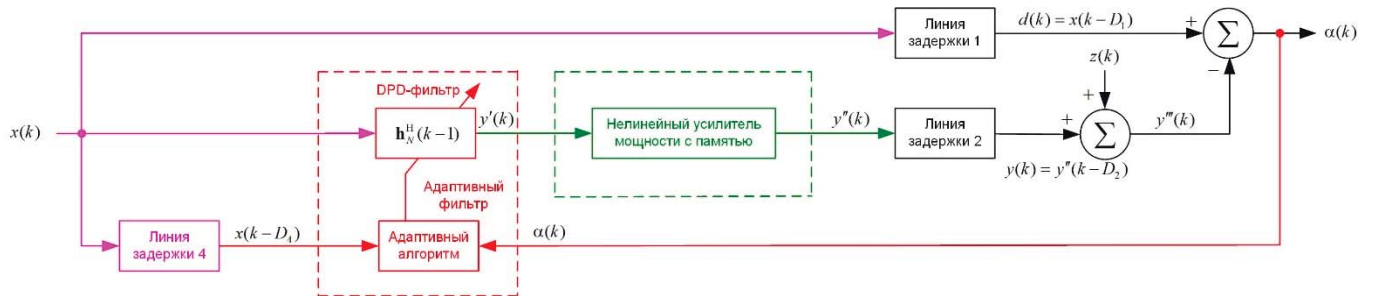


Рис. 4. Детальная архитектура традиционного DPD с прямым обучением

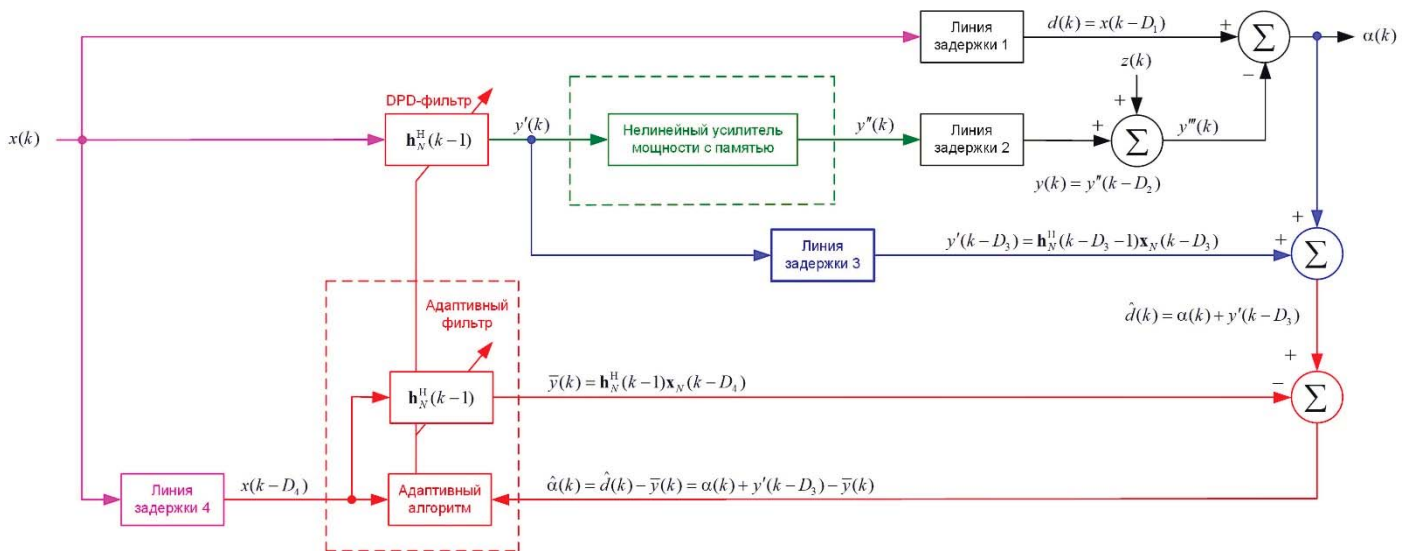


Рис. 5. Детальная архитектура модифицированного DPD с прямым обучением

Данная возможность обеспечивается следующим образом. В модифицированной архитектуре DPD с прямым обучением, задержанный на D_4 отсчётов сигнал $x(k - D_4)$ используется как входной сигнал адаптивного фильтра, т.е. сигнал, формирующий вектор отсчётов $\hat{\mathbf{x}}_N(k) = \mathbf{x}_N(k - D_4)$ в его линиях задержки. Вектор $\hat{\mathbf{x}}_N(k)$ одновременно используется и в алгоритме вычисления ВК данного фильтра, которые копируются в DPD-фильтр.

Требуемый сигнал адаптивного фильтра $\hat{d}(k)$ формируется из сигнала ошибки $\alpha(k)$ как

$$\hat{d}(k) = \alpha(k) + y'(k - D_3),$$

где

$$y'(k - D_3) = \mathbf{h}_N^H(k - D_3 - 1) \mathbf{x}_N(k - D_3).$$

Так как $D_4 = D_3$ и ВК адаптивного фильтра в установившемся состоянии практически не изменяются, т.е.

$$\mathbf{h}_N(k - D_3 - 1) \approx \mathbf{h}_N(k - 1),$$

то

$$\bar{y}(k) = \mathbf{h}_N^H(k - 1) \mathbf{x}_N(k - D_4) \approx y'(k - D_3) = \mathbf{h}_N^H(k - 1) \mathbf{x}_N(k - D_3).$$

Следовательно, сигнал ошибки $\hat{\alpha}(k)$ адаптивного фильтра определяется как

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{d}(k) - \bar{y}(k) = \alpha(k) + y'(k - D_3) - \bar{y}(k) \approx \alpha(k).$$

Рассмотренная модификация DPD с прямым обучением позволяет использовать в архитектуре (рис. 5) любой алгоритм вычисления ВК адаптивного фильтра, базирующийся на минимизации различных функции от ошибки $\hat{\alpha}(k) \approx \alpha(k)$. Математические модели DPD (рис. 2 и рис. 5) с адаптивными фильтрами на базе RLS-алгоритмов приведены ниже.

Математическая модель DPD с непрямым обучением

Инициализация : $\mathbf{x}_N(0) = \mathbf{0}_N$, $\mathbf{y}_N''(k)$, $\mathbf{h}_N(0)$, $\mathbf{x}_{N_{D_1}}(0) = \mathbf{0}_{N_{D_1}}$,

$$\mathbf{y}_{N_{D_2}}''(0) = \mathbf{0}_{N_{D_2}}, \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(0) = \mathbf{0}_{N_{D_3}}, \mathbf{R}_N^{-1}(0) = \delta^{-2} \mathbf{I}_N$$

For $k = 1, 2, \dots, K$

$$\mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{2:N_{D_1}} = \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{1:N_{D_1}-1}, \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_1 = x(k)$$

$$d(k) = \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{N_{D_1}} = x(k - D_1)$$

For $m = 1, 2, \dots, M$

$$\mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_{2:N_m} = \mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_{1:N_m-1}, \mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_1 = f_m \{x(k)\}$$

End for m

$$\mathbf{x}_N(k) = [\mathbf{x}_{N_1}^T(k), \mathbf{x}_{N_2}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_m}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_M}^T(k)]^T$$

$$y'(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{x}_N(k)$$

$$y''(k) = f_{yM} \{y'(k)\}$$

$$\mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{2:N_{D_2}} = \mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{1:N_{D_2}-1}, \mathbf{y}_{N_{D_2}}(k) \Big|_1 = y''(k)$$

$$y'''(k) = \mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{N_{D_2}} + z(k) = y''(k - D_2) + z(k) = y(k) + z(k)$$

$$\alpha(k) = d(k) - y'''(k)$$

$$\mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{2:N_{D_3}} = \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{1:N_{D_3}-1}, \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_1 = y'(k)$$

$$\hat{d}(k) = \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{N_{D_3}} = y'(k - D_3)$$

For $m = 1, 2, \dots, M$

$$\mathbf{y}_{N_m}'''(k) \Big|_{2:N_m} = \mathbf{y}_{N_m}'''(k) \Big|_{1:N_m-1}, \mathbf{y}_{N_m}'''(k) \Big|_1 = f_m \{y'''(k)\}$$

End for m

$$\mathbf{y}_N'''(k) = [\mathbf{y}_{N_1}'''(k), \mathbf{y}_{N_2}'''(k), \dots, \mathbf{y}_{N_m}'''(k), \dots, \mathbf{y}_{N_M}'''(k)]^T$$

$$\hat{y}(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{y}_N'''(k)$$

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{d}(k) - \hat{y}(k)$$

$$\mathbf{g}_N(k) = \frac{\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) \mathbf{y}_N'''(k)}{\lambda + \mathbf{y}_N'''H(k) \mathbf{R}_N^{-1}(k-1) \mathbf{y}_N'''(k)}$$

$$\mathbf{R}_N^{-1}(k) = \lambda^{-1} [\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) - \mathbf{g}_N(k) \mathbf{y}_N'''H(k) \mathbf{R}_N^{-1}(k-1)]$$

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mathbf{g}_N(k) \hat{\alpha}^*(k)$$

End for k

Математическая модель модифицированного DPD с прямым обучением

Инициализация : $\mathbf{x}_N(0) = \mathbf{0}_N$, $\hat{\mathbf{x}}_N(k)$, $\mathbf{h}_N(0)$, $\mathbf{x}_{N_{D_1}}(0) = \mathbf{0}_{N_{D_1}}$,

$$\mathbf{y}_{N_{D_2}}''(0) = \mathbf{0}_{N_{D_2}}, \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(0) = \mathbf{0}_{N_{D_3}}, \mathbf{x}_{N_{D_4}}(0) = \mathbf{0}_{N_{D_4}}, \mathbf{R}_N^{-1}(0) = \delta^{-2} \mathbf{I}_N$$

For $k = 1, 2, \dots, K$

$$\mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{2:N_{D_1}} = \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{1:N_{D_1}-1}, \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_1 = x(k)$$

$$d(k) = \mathbf{x}_{N_{D_1}}(k) \Big|_{N_{D_1}} = x(k - D_1)$$

For $m = 1, 2, \dots, M$

$$\mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_{2:N_m} = \mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_{1:N_m-1}, \mathbf{x}_{N_m}(k) \Big|_1 = f_m \{x(k)\}$$

End for m

$$\mathbf{x}_N(k) = [\mathbf{x}_{N_1}^T(k), \mathbf{x}_{N_2}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_m}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_M}^T(k)]^T$$

$$y'(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{x}_N(k)$$

$$y''(k) = f_{yM} \{y'(k)\}$$

$$\mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{2:N_{D_2}} = \mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{1:N_{D_2}-1}, \mathbf{y}_{N_{D_2}}(k) \Big|_1 = y''(k)$$

$$y'''(k) = \mathbf{y}_{N_{D_2}}''(k) \Big|_{N_{D_2}} + z(k) = y''(k - D_2) + z(k) = y(k) + z(k)$$

$$\alpha(k) = d(k) - y'''(k)$$

$$\mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{2:N_{D_3}} = \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{1:N_{D_3}-1}, \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_1 = y'(k)$$

$$\hat{d}(k) = \alpha(k) + \mathbf{y}_{N_{D_3}}'(k) \Big|_{N_{D_3}} = \alpha(k) + y'(k - D_3)$$

$$\mathbf{x}_{N_{D_4}}(k) \Big|_{2:N_{D_4}} = \mathbf{x}_{N_{D_4}}(k) \Big|_{1:N_{D_4}-1}, \mathbf{x}_{N_{D_4}}(k) \Big|_1 = x(k)$$

For $m = 1, 2, \dots, M$

$$\hat{\mathbf{x}}_{N_m}(k) \Big|_{2:N_m} = \hat{\mathbf{x}}_{N_m}(k) \Big|_{1:N_m-1},$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{N_m}(k) \Big|_1 = f_m \{\mathbf{x}_{N_{D_4}}(k)\} = f_m \{x(k - D_4)\}$$

End for m

$$\hat{\mathbf{x}}_N(k) = [\hat{\mathbf{x}}_{N_1}^T(k), \hat{\mathbf{x}}_{N_1}^T(k), \dots, \hat{\mathbf{x}}_{N_m}^T(k), \dots, \hat{\mathbf{x}}_{N_M}^T(k)]^T$$

$$\hat{y}(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1) \hat{\mathbf{x}}_N(k)$$

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{d}(k) - \hat{y}(k)$$

$$\mathbf{g}_N(k) = \frac{\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) \hat{\mathbf{x}}_N(k)}{\lambda + \hat{\mathbf{x}}_N^H(k) \mathbf{R}_N^{-1}(k-1) \hat{\mathbf{x}}_N(k)}$$

$$\mathbf{R}_N^{-1}(k) = \lambda^{-1} [\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) - \mathbf{g}_N(k) \hat{\mathbf{x}}_N^H(k) \mathbf{R}_N^{-1}(k-1)]$$

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mathbf{g}_N(k) \hat{\alpha}^*(k)$$

End for k

В данных моделях DPD использован RLS-алгоритм на основе леммы об обращении матрицы [7, 8]. Здесь $\delta^{-2} \geq 0.1\sigma^2$ – это параметр начальной регуляризации обратной корреляционной матрицы $\mathbf{R}_N^{-1}(0)$ входного сигнала адаптивного фильтра, σ^2 – дисперсия входного сигнала адаптивного фильтра, \mathbf{I}_N – единичная матрица, $1 - 1/N < \lambda < 1$ – параметр экспоненциального взвешивания обрабатываемых сигналов, $\mathbf{g}_N(k)$ –

вектор коэффициентов Калмана, а M – число каналов адаптивного фильтра. Выражения типа $\mathbf{x}_N(k)|_{1:N-1}$ и $\mathbf{x}_N(k)|_1$ обозначают номера элементов в векторе,

В приведенных выше моделях DPD с памятью, для вычисления вектора $\mathbf{g}_N(k)$ могут также быть использованы процедуры других математически эквивалентных RLS-алгоритмов, включая их быстрые, т.е. вычислительно эффективные, версии [7, 8]. В этом случае инициализацию этих процедур следует выполнять как показано в [7].

Запись $y''(k) = f_{yM}\{y'(k)\}$ обозначает нелинейную функцию преобразования входного сигнала УМ $y'(k)$ в его выходной сигнал $y''(k)$. В настоящей работе нелинейное преобразование, реализующее обратную модель нелинейного УМ с памятью, формируется диагональными ядрами фильтра Вольтера [6]. Каждое ядро (включая линейное) характеризуется своей функцией $f_m\{\cdot\}$ преобразования поступающего на его вход сигнала. Поэтому каждый нелинейный DPD-фильтр и каждый нелинейный адаптивный фильтр на рис. 1 – рис. 5 представляются одинаковыми M -канальными линейными фильтрами. В настоящей работе, число ВК N_m , $m = 1, 2, \dots, M$ в каждом из каналов этих фильтров принято одинаковым, хотя может быть и разным.

В общем случае, нелинейное преобразование DPD, описываемое рядом Вольтера, устанавливает следующее соотношение между его входным $x(k)$ и выходным $y'(k)$ сигналами:

$$y'(k) = \sum_{i=0}^{\infty} h_i^{(1)*}(k-1)x(k-i) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=i}^{\infty} \sum_{l=j}^{\infty} h_{i,j,l}^{(3)*}(k-1)x(k-i)x(k-j)x^*(k-l) + \dots$$

Здесь $h_i^{(1)*}$ – это ВК линейной части модели, а $h_{i,j,l}^{(m)*}$ – ВК модели ядра m -го порядка ($m = 3, 5, 7, \dots$). В моделях DDP обычно используются ядра нечетных порядков [3-5], так как ядра четных порядков формируют искажения, сигналы которых выходят за пределы полосы частот $\pm F_D / 2$, а потому подавляются полосовым аналоговым фильтром, обычно присутствующим на выходе УМ радиопередатчика.

Реализация приведенной выше нелинейной модели требует значительных вычислительных ресурсов и элементов задержки сигналов (памяти).

Учитывая, что значения ВК моделей линейных и нелинейных четырехполосников обычно убывают с ростом номеров ВК моделирующих их фильтров, то вклад таких ВК в формирование выходного сигнала модели становится несущественным. Поэтому на практике модель DPD часто представляется лишь конечным числом M диагональных ядер нечетных порядков, включая линейное ядро, с фиксированным числом ВК N_m , т.е. самыми большими ВК в каждом ядре [14]. Пример такой модели 3-го порядка приведен ниже

$$y'(k) = \sum_{i=0}^{N_1-1} h_i^{(1)*}(k-1)x(k-i) + \sum_{i=0}^{N_3-1} h_i^{(3)*}(k-1)x(k-i)x(k-i)x^*(k-i) + \dots = \sum_{i=0}^{N_1-1} h_i^{(1)*}(k-1)x(k-i) + \sum_{i=0}^{N_3-1} h_i^{(3)*}(k-1)|x(k-i)|^2 = \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{x}_N(k),$$

где

$$\mathbf{h}_N(k) = [\mathbf{h}_{N_1}^{(1)T}(k), \mathbf{h}_{N_3}^{(3)T}(k)]^T,$$

$$\mathbf{x}_N(k) = [\mathbf{x}_{N_1}^{(1)T}(k), \mathbf{x}_{N_3}^{(3)T}(k)]^T,$$

$$\mathbf{x}_N^{(1)}(k) = [x(k), x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-N_1+1)]^T$$

и

$$\mathbf{x}_N^{(3)}(k) = [x(k)|x(k)|^2, x(k-1)|x(k-1)|^2, x(k-2)|x(k-2)|^2, \dots, x(k-N_3+1)|x(k-N_3+1)|^2]^T.$$

В следующем разделе, при получении результатов моделирования DPD (рис. 2 и рис. 5) использованы диагональные ядра 1-го, 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков.

Моделирование

Проверка работоспособности представленных в работе DPD в разных режимах выполнялась в тестовой среде, представленной на рисунке 6. Один из таких режимов рассматривается ниже.

Передаваемые данные модулировались квадратурной амплитудной модуляцией с числом символов в алфавите, равным 16 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM-16). Эти символы $x(k_c)$ следовали на дискретных отсчётах k_c .

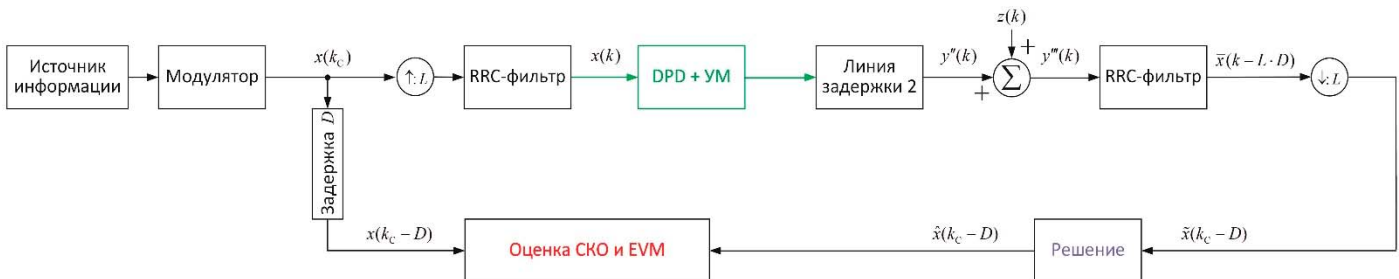


Рис. 6. Архитектура тестовой среды для исследования DPD

Поскольку возникающие в УМ нелинейные искажения находятся за пределами полосы частот информационного сигнала, то для расширения этой полосы символы $x(k_c)$ подвергались стандартной процедуре интерполяции [1] путём добавления $L-1$ нулевых отсчётов между каждой парой соседних символов сигнала $x(k_c)$ и последующего сглаживания полученной последовательности данных с помощью фильтра типа «корень квадратный из приподнятого косинуса» (Raised Root Cosine, RRC). Значение коэффициента интерполяции/децимации L было выбрано равным 16, число ВК RRC-фильтра N_{RRC} – равным 129, а коэффициент сглаживания RRC-фильтра – равным 0.35. Результат интерполяции – это отсчёты сигнала $x(k)$. В моделировании, они следуют на частоте дискретизации $F_d = 16$ МГц, в $L = 16$ раз превышающей частоту следования информационных символов $x(k_c)$, равную $F_c = 1$ МГц.

Сигнал $x(k)$ является входным сигналом исследуемых DPD. Выходной сигнал «Линии задержки 2» $y(k)$ смешивается с шумом $z(k)$, см. рис. 1-6, и обратно децимируется для получения задержанных отсчётов сигнала $\tilde{x}(k_c - D)$ с выхода УМ на символьной скорости. Децимация производится путем сглаживания отсчётов сигнала $y'(k)$ с выхода «Линии задержки 2» с помощью такого же RRC-фильтра как при интерполяции и прореживания отсчетов выходного сигнала этого фильтра $\bar{x}(k - L \cdot D)$ в L раз. На рисунке 6 символом $\uparrow: L$ обозначается устройство, добавляющее нулевые отсчёты в поступающую на ее вход последовательность данных, а символом $\downarrow: L$ – устройство, прореживающее данные.

С помощью устройства принятия решений отсчёты $\bar{x}(k - L \cdot D)$ преобразуются в информационные символы $\hat{x}(k_c - D)$. Для оценки качества работы DPD в терминах передаваемых информационных символов $x(k_c)$ эти символы задерживаются на D отсчётов, следующих с периодом $T_c = 1 / F_c$, где значение $D = (D_1 + 2D_{RRC}) / L$, а D_{RRC} – это задержка сигнала в одном RRC-фильтре, исчисляемая числом периодов T_d .

Используя отсчёты $x(k_c - D)$ и $\hat{x}(k_c - D)$, можно в установленном состоянии работы адаптивного фильтра оценить значение нормированного СКО информационных символов, прошедших через DPD и УМ, которое определяется как

$$CKO = 10 \log_{10} \frac{E \left\{ |x(k_c - D) - \hat{x}(k_c - D)|^2 \right\}}{E \left\{ |x(k_c - D)|^2 \right\}},$$

где $E \{ \bullet \}$ – это операция усреднения данных на интервале их наблюдения.

Эта же величина в процентах носит название «Модуль вектора ошибки» (Error Vector Magnitude, EVM). Она определяется как

$$EVM = \sqrt{\frac{E \left\{ |x(k_c - D) - \hat{x}(k_c - D)|^2 \right\}}{E \left\{ |x(k_c - D)|^2 \right\}}} 100\% .$$

Качество работы DPD как нелинейного адаптивного устройства определяется по виду графиков АМ-АМ и АМ-ФМ характеристик и графиков спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов. Численно качество работы DPD определяется как отношение мощности сигнала за пределами полосы частот информационного сигнала к мощности сигнала в этой полосе. Это отношение известно как Adjacent Channel Power Ratio (ACPR).

Исследование DPD проводилось при отношении сигнал-шум (ОСШ) на выходе УМ, равном 40 дБ, где сигнал $z(k)$ моделировался белым гауссовым шумом (БГШ). Глубина памяти УМ равнялась 7 отсчётам. DPD – это по сути нелинейный адаптивный эквалайзер, выравнивающий характеристики УМ. Согласно [15], число ВК в адаптивном фильтре эквалайзера должно быть, как минимум, в два раза больше числа ВК фильтра выравниваемого объекта. Поэтому, число ВК адаптивного фильтра DPD в каждом из его каналов было выбрано одинаковым и равным $N_m = 15$.

В таблице 1 приведены численные результаты исследования качества работы DPD, полученные путем моделирования. Видно, что с ростом числа даже усеченных нелинейных ядер качество DPD увеличивается в терминах всех показателей, приведенных в этой таблице.

При максимальном числе ядер, равном пяти, эти показатели приближаются к показателям БГШ-канала, т.е. четырёх-полосника, не содержащего линейных и нелинейных искажений. Так в БГШ-канале при $ОСШ = 40$ дБ, значения CKO и EVM равны соответственно -36.0 дБ и 1.6%, а в рассматриваемом УМ без DPD эти значения и показатель $ACRP$ равны -19.9 дБ, 10.06%, и -24.3дБ, соответственно.

Таблица 1

Численные результаты моделирования

Используемые нелинейные ядра		3-го порядка	3-го и 5-го порядков	3- го, 5- го и 7-го порядков	3- го, 5- го, 7-го и 9-го порядков
CKO , дБ	Модиф. DPD с прямым обуч.	-27,8	-33,0	-34,8	-35,5
	DPD с непрямым обуч.	-22,1	-32,8	-33,9	-35,4
EVM , %	Модиф. DPD с прямым обуч.	4,08	2,24	1,82	1,69
	DPD с непрямым обуч.	7,84	2,30	2,56	1,70
$ACPR$, дБ	Модиф. DPD с прямым обуч.	-28,1	-32,3	-34,2	-35,7
	DPD с непрямым обуч.	-25,1	-30,6	-31,5	-32,6

Следовательно, в рассматриваемых условиях работы, модифицированный DPD с прямым обучением и с пятью ядрами улучшает показатель $ACPR$ УМ на 11.4 дБ, а DPD с непрямым обучением – на 8.3 дБ.

Численные различия CKO и EVM в рассматриваемых DPD не столь значительные, т.к. эти параметры оцениваются после фильтрации RRC-фильтром и прореживания, т.е. только в полосе частот информационного сигнала. В тоже время, дости-

гаемый показатель $ACPR$ в модифицированном DPD с прямым обучением заметно лучше, чем в DPD с непрямым обучением.

Данные выводы также подтверждаются графиками, которые для DPD с линейным ядром и нелинейными ядрами 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков приведены на рисунке 7. Видно, что в отличие от DPD с непрямым обучением, модифицированный DPD с прямым обучением практически полностью устра-

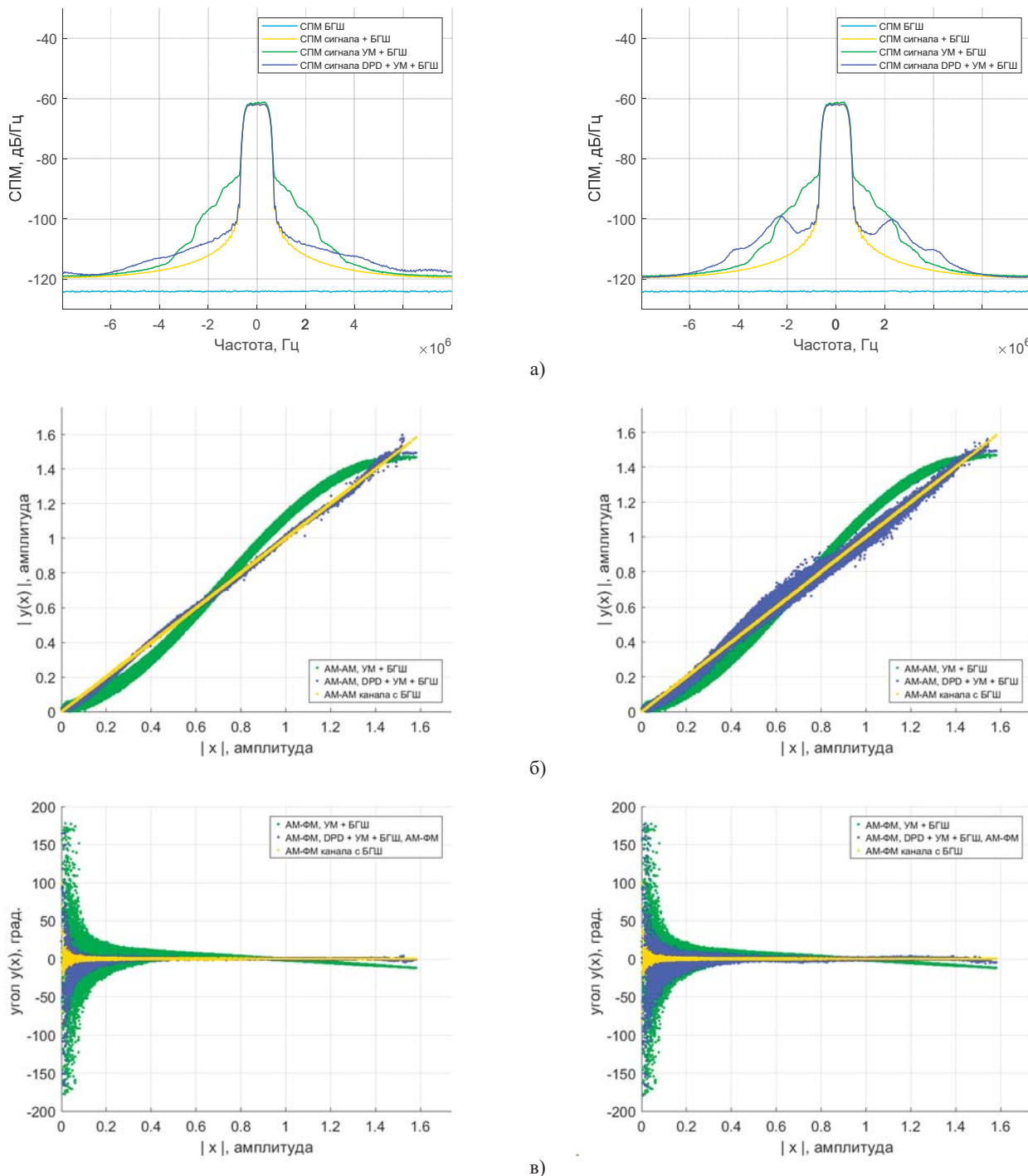


Рис. 7. Результаты моделирования, слева – модифицированный DPD с прямым обучением, справа – DPD с непрямым обучением: а) – СПМ; б) – AM-AM характеристики; в) – AM-ФМ характеристики

няет внеполосные искажения в выходном сигнале УМ, и значительно лучше выравнивает его АМ-АМ и АМ-ФМ характеристики.

Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют об очевидном функциональном превосходстве модифицированного DPD с прямым обучением перед DPD с непрямым обучением в одинаковых условиях работы.

Результаты, аналогичные представленным в табл. 1 и на рис. 7, достигаются и при использовании других видов цифровой модуляции информационных символов, и при других размерах их алфавитов при ОСШ, позволяющем эти символы различать. Похожие результаты получаются и при использовании моделей других нелинейных УМ.

Выводы

Таким образом, в данной статье рассмотрены DPD с прямым обучением и модифицированный DPD с прямым обучением. Результаты компьютерного моделирования демонстрируют работоспособность этих DPD, а также демонстрируют явное функциональное превосходство модифицированного DPD с прямым обучением перед DPD с непрямым обучением в терминах значений *СКО* и *EVM* информационных символов в выходном сигнале нелинейного УМ, в терминах значений *АСРР*, а также в терминах вида выровненных АМ-АМ и АМ-ФМ характеристик. Полученные результаты могут быть полезны при выборе архитектуры DPD для различных УМ радиопередатчиков современных систем цифровой радиосвязи.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. *Duman T. M.* Fundamentals of digital communication systems. Cambridge University Press, 2025. 434 p.

2. *Raab F. H.* RF and microwave power amplifiers. Artech House, 2025. 467 p.

3. *Abdulrahman B.* Adaptive digital predistortion for power amplifier linearization. LAB LAMBERT Academic Publishing, 2016. 204 p.

4. *Abomaali M.* Digital predistorter model for high power amplifier for nonlinearity challenges // *2023 6th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA)*. Al-Najaf, Iraq, 2023. P. 306-312.

5. *Chen B., Wu W.* Principles, applications and challenges of digital predistortion technology // *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 54. March 2024. P. 64-75.

6. *Crespo-Cadenas C., Madero-Ayora M. J., Becera J. A.* Volterra approach to digital predistortion: sparse identification. Wiley-IEEE Press, 2024. 259 p.

7. *Джиган В. И.* Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.

8. *Diniz P. S. R.* Adaptive filtering algorithms and practical implementation, 5-th ed. Springer, 2020. 495 p.

9. *Eun C., Powers E. W.* A new Volterra predistorter based on indirect learning architecture // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1997. Vol. 4. No 1. P. 223-227.

10. *Zou D., DeBrunner V. E.* Novel adaptive nonlinear predistorters based on the direct learning algorithms // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2007. Vol. 55. No. 1. P. 120-133.

11. *Djigan V. I., Dolgikh D. A., Smekalov A. I., Shi H.* Predistortion device // *United State Patent № US 10171041 B2*. H 03F 1/32. Publ. 01.01.2019. 36 p.

12. *Bouchard M., Quednau S.* Multichannel Recursive-Least-Squares algorithms and Fast-Transversal-Filter algorithms for active noise control and sound reproducing system // *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. 2000. Vol. 8. No. 5. P. 606-618.

13. *Джиган В.И.* Активное шумоподавление: архитектуры, алгоритмы и их параметры // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. № 8. С. 4-12.

14. *Джиган В.И.* Оценка качества адаптивной фильтрации в задаче идентификации линейных объектов // *Цифровая обработка сигналов*. 2023. № 4. С. 13-17.

15. *Уидроу Б., Стивнз С.* Адаптивная обработка сигналов. Пер. с англ. под ред. В.В. Шагхильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.

COMPARATIVE EFFICIENCY OF SIGNAL DIGITAL PREDISTORTERS BASED ON ADAPTIVE RECURSIVE LEAST SQUARES ALGORITHMS

Victor I. Djigan, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia;
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia,
dzhigan_vi@nrcki.ru

Abstract

Digital signal predistortion is widely used in radio transmitters of communication systems today. It allows to linearize the so-called Amplitude-to-Amplitude Modulation (AM-AM) and Amplitude-to-Phase Modulation (AM-PM) characteristics of nonlinear power amplifiers (PA). The linearization occurs due to the predistortion of signals coming at the PA input so that the resulting AM-AM and AM-PM characteristics of the cascade connection of the Digital Predistorter (DPD) and nonlinear PA are linearized. As a result, the out-of-band distortions are reduced in the PA output signal. This leads to an increase in its desired output power and leads to the elimination of the distortions of the transmitted informational symbols. A DPD is an adaptive device. There are two kinds of the DPD: with indirect and with direct learning. Adaptive DPD with indirect learning are mainly used. They can use the adaptive filters based on both the simple stochastic gradient descent algorithms and can use the more complex and more efficient Recursive Least Squares (RLS) criterion algorithms. The RLS algorithms cannot be used in the traditional DPD with direct learning, but they can be used in the modified architectures of the DPD. The paper considers the architectures of the mentioned DPD and their mathematical models when using the adaptive filters based on the RLS algorithms. The comparative efficiency of the considered DPD is demonstrated by means of computer simulation. The simulation uses a model of a PA with memory. The nonlinear DPD is modeled by a multichannel linear adaptive filter, the

channels of which correspond to the truncated diagonal kernels of odd degrees of Volterra filters. The memory depth (the number of delay elements in each channel of such a filter) equals to the doubled memory depth of the PA model. The adaptive filter weights have been calculated using the RLS-algorithm in both of the considered DPD. It has been found that when using a linear kernel and truncated diagonal kernels of the third, fifth, seventh and ninth degrees, the modified DPD with direct learning almost completely eliminates the out-of-band distortions in the PA output signal. Using such DPD for the PA under consideration, the signal distortion suppression has been achieved of about 11.4 dB, while using DPD with indirect learning it has been achieved of about 8.3 dB. These numerical indicators, graphs of spectral power densities and graphs of AM-AM and AM-PM characteristics demonstrate the functional superiority of the DPD with direct learning compared to the DPD with indirect learning.

Keywords: Digital Predistorters (DPD) of signals, power amplifiers, Recursive Least Squares (RLS) adaptive filtering algorithms, indirect learning DPD, direct learning DPD, traditional architecture, modified architecture

References

- [1] T. M. Duman, *Fundamentals of Digital Communication Systems*, Cambridge University Press, 2025, 434 p.
- [2] F. H. Raab, *RF and Microwave Power Amplifiers*, Artech House, 2025, 467 p.
- [3] B. Abdulrahman, *Adaptive Digital Predistortion for Power Amplifier Linearization*, LAB LAMBERT Academic Publishing, 2016, 204 p.
- [4] M. Abomaali, "Digital predistorter model for high power amplifier for nonlinearity challenges," *2023 6th International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA)*, Al-Najaf, Iraq, 2023, pp. 306-312.
- [5] B. Chen and W. Wu, "Principles, applications and challenges of digital predistortion technology," *Applied and Computational Engineering*, vol. 54, March 2024, pp. 64-75.
- [6] C. Crespo-Cadenas, M. J. Madero-Ayora, and Becera J. A., *Volterra Approach to Digital Predistortion: Sparse Identification*, Willey-IEEE Press, 2024, 259 p.
- [7] V. I. Djigan, *Adaptive Filtering: Theory and Algorithms*, Moscow, Technosfera Publisher, 2013, 528 p. (In Russian).
- [8] P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation*, 5-th ed, Springer, 2020, 495 p.
- [9] C. Eun C. and E. W., "A new Volterra predistorter based on indirect learning architecture," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 223-227.
- [10] D. Zou and V. F. DeBrunner, "Novel adaptive nonlinear predistorters based on the direct learning algorithms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, vol. 55, no 1, pp. 120-133.
- [11] V. I. Djigan, D. A. Dolgikh, A. I. Smekalov, H. Shi, "Predistortion device," United State Patent № US 10171041 B2, H 03F 1/32, publ. 01.01.2019, 36 p.
- [12] M. Bouchard and S. Quednau, "Multichannel Recursive-Least-Squares algorithms and Fast-Transversal-Filter algorithms for active noise control and sound reproducing system," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2000, vol. 8, no. 5, pp. 606-618.
- [13] V. I. Djigan, "Active Noise Control: Architectures, Algorithms and its Parameters," *T-Comm*, 2025, no. 8, pp. 4-12.
- [14] V. I. Djigan, "Quality estimation of adaptive filtering in problem of linear object identification," *Digital Signal Processing*. Moscow, 2023, no. 4, pp. 13-17. (In Russian)
- [15] B. Widrow. S. D. Stearns. *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1985, 496 p.

Information about authors:

Victor I. Djigan, Doctor of Sciences, Professor, Principal Researcher Department for Design Problems in Microelectronics of National Research Center "Kurchatov Institute"; Professor, Institute of Microdevices and Control Systems of National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia. ORCID 0000-0001-7485-1623

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНЫХ КВ РАДИОЛИНИЙ И СЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ К ПЕРЕДАЧЕ ПОЛУЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Иванов Дмитрий Владимирович,
Поволжский государственный технологический университет,
г. Йошкар-Ола, Россия, IvanovDV@volgatech.net

Иванов Владимир Алексеевич,
Поволжский государственный технологический университет,
г. Йошкар-Ола, Россия, IvanovVA@volgatech.net

Рябова Наталья Владимировна,
Поволжский государственный технологический университет,
г. Йошкар-Ола, Россия, RyabovaNV@volgatech.net

Конкин Никита Александрович,
Поволжский государственный технологический университет,
г. Йошкар-Ола, Россия, KonkinNA@volgatech.net

Чернов Андрей Алексеевич,
Поволжский государственный технологический университет,
г. Йошкар-Ола, Россия, ChernovAA@volgatech.net

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-15-22

Manuscript received 12 August 2025;
Accepted 17 October 2025

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда, грант № 23-19-00145.

Ключевые слова: КВ радиоканал, диагностика, ионосфера, сенсорная сеть, передача информации, алгоритм маршрутизации, протокол обмена данными, имитационное моделирование, OMNeT++

В работе получили развитие методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов и одновременной высоконадежной передачи полученной информации. Для анализа функционирования распределенных сенсорных сетей проведено имитационное моделирование в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET, реализована модель ad-hoc сети на протоколе AODV с пятью диагностическими пунктами и различной протяженностью радиотрасс. Моделирование подтвердило эффективность разработанных алгоритмов маршрутизации и параметров канального уровня для высоконадежной передачи данных в условиях помех и изменчивости КВ каналов. Представлены разработанные для этих целей в ПГТУ устройства диагностики и высоконадежной передачи информации с использованием программно-конфигурируемых технологий. Экспериментально реализован фрагмент сети для радиолинии протяженностью 80 км.

Информация об авторах:

Иванов Дмитрий Владимирович, Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-3609-1157. Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн.

Иванов Владимир Алексеевич, Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-9860-4771. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы.

Рябова Наталья Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-3515-4750. Область научных интересов – информационно-телекоммуникационные системы, ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивные системы.

Конкин Никита Александрович, Старший преподаватель кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0001-7052-748X. Область научных интересов – анализ данных дистанционного зондирования ионосферы, машинное обучение, нейронные сети.

Чернов Андрей Алексеевич, Кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. Область научных интересов – синхронизация систем связи и зондирования, машинное обучение.

Для цитирования:

Иванов В. А., Иванов Д. А., Рябова Н.В., Конкин Н.А., Чернов А.А. Сенсорная диагностика ионосферных КВ радиолиний и сетевые подходы к передаче полученной информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. № 11. С. 15-22.

For citation:

V. A. Ivanov, D. A. Ivanov, N. V. Ryabova, N. A. Konkin, A. A. Chernov. "Sensor diagnostics of ionospheric short-wave radio lines and network approaches to transmitting received information," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.11, pp. 15-22. (in Russian)

Введение

В настоящее время развитие беспроводных инфокоммуникационных технологий обуславливает постановку новых задач, предполагающих использование сложных сигналов различного типа и современных методов их обработки, что влечет за собой модернизацию радиосистем. В частности, внедрение многоэлементных беспроводных сенсорных сетей (БСС) требует разработки специализированных алгоритмов и протоколов с последующей их программно-аппаратной реализацией [1-2], а также создания алгоритмов, обеспечивающих функции самоконфигурации, самосборки, самодиагностики и самовосстановления в условиях изменения внешней среды или отказа отдельных сетевых узлов.

Данные задачи обладают существенной сложностью, т.к. на КВ радиоканал оказывает существенное влияние частотно-временная изменчивость условий распространения в среде (ионосфере) и изменчивость внутриканальных помех различной природы, особенно сосредоточенных помех. Хорошо известно, что КВ сигналы распространяются от передатчика к приемнику скачковыми модами – лучами отражающимися последовательно от слоя ионосферы и земли. Для скачкового распространения принципиальное значение имеют ионосферные слои: E, F1, F2. В системах цифровой связи информация передается достаточно длинными импульсами, которые на приемной антенне интерферируют. В результате проявляется негативный эффект межмодовой частотно-временной дисперсии (рассеяния импульсов по доплеровской частоте и задержке), приводящий к замираниям сигнала. Модовый состав сигнала зависит от протяженности трассы и меняется от геофизических условий среды. Например, длина скачка моды 1E не превышает 2000км, 1F1 – 3000 км и 1F2 – 4000 км.

Для повышения в таких условиях надежности и качества связи необходима работа в оптимальном режиме, который из-за изменчивости канала и канальных помех должен быть адаптивным. Последнее требует использования средств сенсорной диагностики параметров дисперсии и помех. Зависимость условий распространения от географического положения трассы ставит задачу разработки сетевых подходов диагностики и передачи информации потребителям. В свою очередь, сетевой подход в КВ связи обуславливает дальнейшее развитие принципов построения соответствующих задаче сетей с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Интенсивное развитие средств сенсорной диагностики всей совокупности каналов из полосы прозрачности КВ радиолинии [4, 6-7] обусловило необходимость использования сложных сигналов и усовершенствования методов их обработки. Таким образом, актуальной является проблема развития методов и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов на множестве дальних радиотрасс, а также методов и средств высоконадежной передачи на большие расстояния полученной информации.

Цель работы заключается в совершенствовании методов и средств сенсорной диагностики ионосферных коротковолновых радиолиний, а также в формировании сетевых подходов для передачи данных, направленных на повышение надежности и устойчивости каналов связи в изменяющихся условиях ионосферной среды.

Для достижения поставленной цели используется современное программно-конфигурируемое оборудование, обеспечивающее совмещение функций диагностики радиоканала и высоконадежной передачи информации. Эффективность и применимость предложенного подхода подтверждаются результатами экспериментальной верификации в реальных условиях работы ионосферных радиолиний.

1 Подходы к построению диагностических беспроводных сетей КВ радиолиний

Одним из вопросов при построении диагностической сети является протяженность радиолиний и плотность охвата территории. Как известно, для диагностики КВ радиолиний могут быть использованы вертикальные или наклонные ионозонды. Развертывание на территории России плотной сети станций вертикального зондирования ионосферы сопряжено со значительными трудностями, обусловленными обширной площадью страны и ее существенной протяженностью в долготном и широтном направлениях. В сложившейся ситуации наиболее рациональным представляется создание сети для вертикально-наклонного зондирования, которое способно обеспечить повышенную плотность охвата наблюдаемых территорий. При этом диагностическая область, формируемая одной станцией, должна иметь радиус, не превышающий 2000 км, что соответствует предельной длине луча, отраженного от слоя E ионосферы.

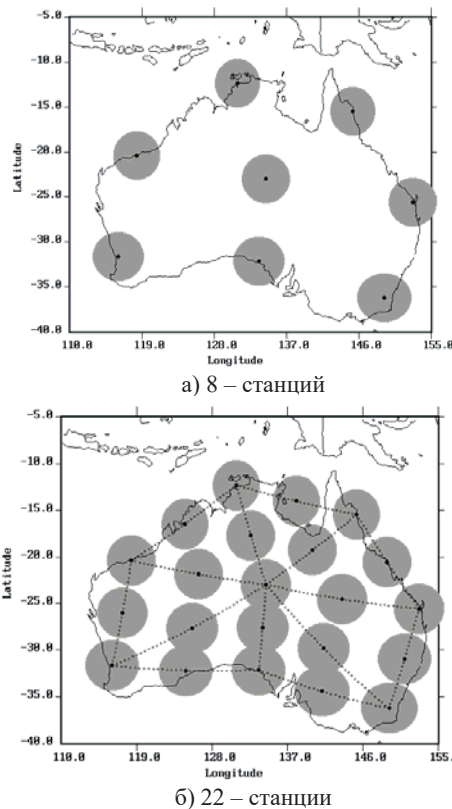


Рис. 1. а – сеть вертикальных сенсоров; б – сеть вертикально-наклонных сенсоров

Иллюстрацией эффективности данной методики служит австралийская сеть ЛЧМ-мониторинга ионосферы.

На рисунке 1а показаны точки размещения станций вертикального зондирования и контролируемые ионосферные области. Очевидно, что восемь станций вертикального зондирования не обеспечивают требуемую пространственную плотности ионосферного контроля. Та же самая сеть ионозондов, представленная на рисунке 1б, но функционирующая в режиме вертикально-наклонного зондирования, по эффективности соответствует работе 22 станций вертикального зондирования. Следовательно, финансовые расходы на формирование сети в значительной степени определяются выбранной методикой.

Благодаря описанной методике достигается требуемая плотность контроля ионосферного состояния. Доказательством служат пространственные распределения MUF(2000) (МПЧ) (рис. 2), полученные при радиомониторинге ионосферы над Австралией в различные периоды суток: а – 06.00UT, б – 12.00UT. По вертикальной оси представлены величины MUF(2000) для радиотрасс длиной 2000 км.

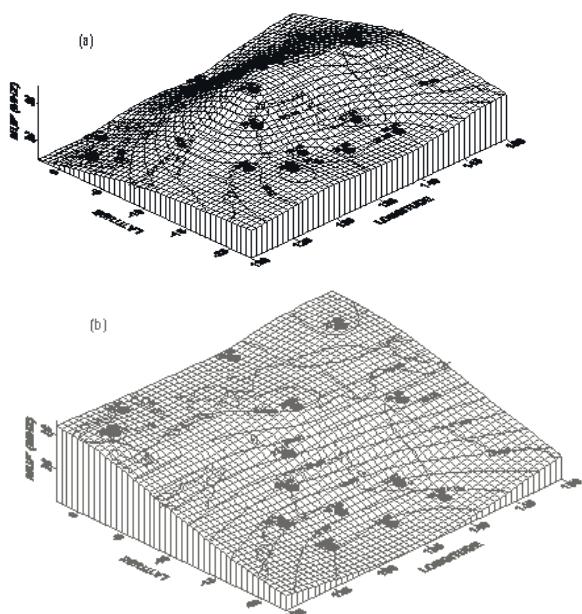


Рис. 2. Пространственные структуры MUF(2000) (МПЧ)

Применительно к российским реалиям, принимая во внимание территориальные масштабы, наиболее целесообразным представляется зональный принцип построения сети. При таком решении 3-4 зоны способны разделить территорию России по широте. Структура сети в границах отдельной зоны может формироваться по аналогии с австралийской моделью. Принцип построения имеет иерархический характер. Информация из зональных центров аккумулируется в центральном узле сети. В зональный центр поступают данные от ионозондов, размещенных в соответствующей зоне.

2 Исследование применимости методологии беспроводных сенсорных сетей для передачи диагностической информации по КВ радиолиниям

При разработке сети коротковолновых радиолиний ключевое значение имеет выбор её топологической конфигурации, от которой зависят основные параметры функциониро-

вания и надежность связи между узлами. В качестве концептуальной основы проведенных исследований была использована модель беспроводных сенсорных сетей, разработанная и реализованная в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН [1-2].

Экспериментальное моделирование выполнялось на испытательной платформе данной беспроводной сенсорной сети с учетом особенностей поставленной задачи. В ходе исследований проводился анализ различных вариантов топологий и сценариев функционирования сети, включая оценку эффективности альтернативных схем маршрутизации и распределения каналов. Такой подход позволил выявить наиболее устойчивые и рациональные решения для организации связи в условиях коротковолнового диапазона.

Принималось во внимание, что в сетевой структуре с промежуточной ретрансляцией данных, когда диагностическая информация от источника не может быть передана непосредственно адресату вследствие существенной дистанции между ними или по причине перегруженности канала трансляции, для гарантирования доставки информации может использоваться алгоритм промежуточной ретрансляции (рис. 3).

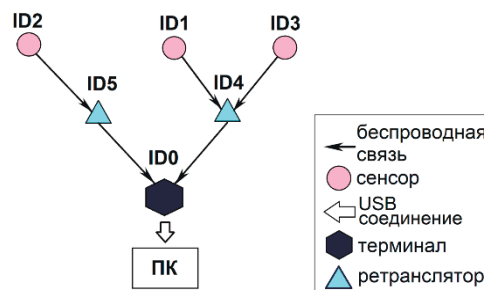


Рис. 3. Топология моделируемой сенсорной сети с ретранслятором

Функцию ретранслятора выполняет приемопередающее устройство (полнофункциональный узел). Оно принимает информационный пакет от абонентского устройства-источника и производит его повторную передачу, если отправитель присутствует в списке доступа данного узла. Этот алгоритм последовательно воспроизводится каждым последующим полнофункциональным узлом, принявшим пакет, до его доставки целевому получателю.

Результаты модельного эксперимента показали, что в условиях ограниченного количества устройств и невысокой интенсивности трафика вероятность синхронной передачи пакетов от различных источников становится пренебрежимо малой. При этом ни сенсорные узлы, ни ретрансляторы не задействуют механизмы предотвращения коллизий, осуществляя передачу данных в строго отведенные временные интервалы.

Организация связи в прямохаотической сети соответствует принципам ad-hoc модели – децентрализованной беспроводной структуры без фиксированной архитектуры. В рамках данной модели сетевое взаимодействие реализуется за счет динамического установления соединений между устройствами, которые самостоятельно формируют сетевую топологию.

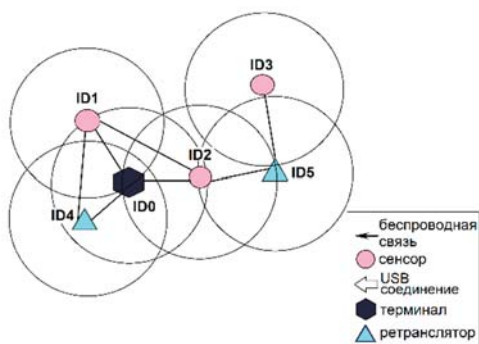


Рис. 4. Структура прямохаотической беспроводной сенсорной сети в режиме ad-hoc

Основополагающий принцип построения ad-hoc сети состоит в условии, согласно которому каждый узел беспроводной сенсорной сети направлен на передачу данных, адресованных прочим узлам. При этом выбор узла производится динамически, опираясь на топологию связности сети (рис.4). Основополагающая идея, лежащая в фундаменте прямохаотической беспроводной сенсорной сети, заключается в том, что при конфигурировании приёмопередатчика на работу в режиме ретранслятора и подключения к нему сенсорного узла, он будет реализовывать одновременно две функции: ретранслировать данные от внешних приёмопередатчиков и транслировать в эфир информацию, поступающую от собственного сенсорного узла.

При выборе алгоритма управления сетью в качестве основных критериев были выбраны: простота реализации и гарантированное обнаружение всех узлов. Для исследования сенсорной сети КВ радиолиний использовалась платформа OMNeT++. Модель представляла ad-hoc сеть по протоколу AODV с пятью узлами, расположенными в г. Москве, г. Йошкар-Оле, о. Кипр, пгт. Диксон и г. Иркутске, с максимальной дальностью до 4500 км. OMNeT++ позволял моделировать передачу сигналов с учетом помех и потерь, а также работу сетевых и прикладных приложений. Сеть должна функционировать по принципу динамического построения маршрутов на основе протокола AODV. Каждый узел периодически обменивается информацией о доступных маршрутах и по необходимости инициирует поиск пути к целевому узлу. Передача данных осуществляется только тогда, когда эфир свободен, что предотвращает коллизии и обеспечивает корректную доставку пакетов. Узлы поддерживают актуальность маршрутов за счет регулярной проверки их доступности и обновления информации о потерях связи. Взаимодействие между сенсорами строится на посылке пакетов с командами и данными. Исследования показали, что в такой сети обеспечивается эффективное распределение ресурсов сети и стабильное функционирование даже при больших расстояниях между узлами.

3 Имитационное моделирование беспроводной сенсорной сети КВ радиолиний передачи диагностической информации в среде OMNET++

Для исследования функционирования распределенной в пространстве сенсорной сети ионосферных КВ радиолиний передачи диагностической информации использовалась платформа OMNeT++ [8] с фреймворком INET [9]. Модель представляет ad-hoc сеть по протоколу AODV (Ad hoc On-Demand

Distance Vector) и состоит из пяти приемо-передающих сенсоров, размещенных в г. Москве (центральный хаб), г. Йошкар-Оле (региональный ретранслятор), о. Кипр (граничный узел), пгт. Диксон (арктическая станция) и г. Иркутск (сибирская станция) (рис. 5). Максимальная дальность между узлами соответствует реальным масштабам региональных сетей диагностики и мониторинга ионосферы.

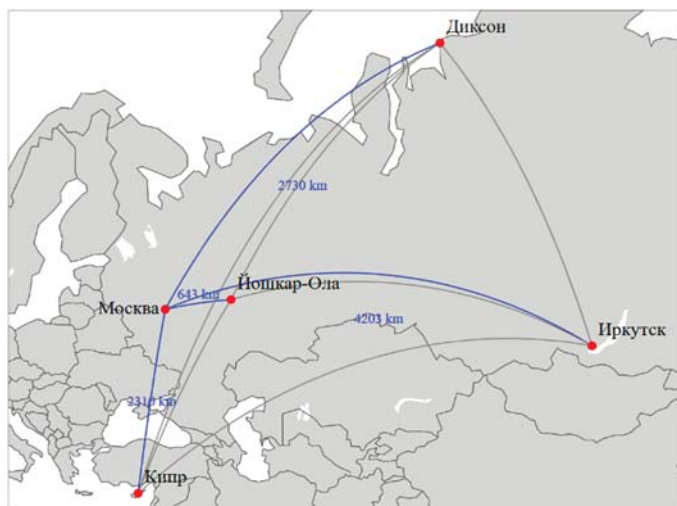


Рис. 5. Структура сенсорной КВ сети в режиме ad-hoc (AODV) для задачи симуляции в OMNeT++

OMNeT++ обеспечивает симуляцию сенсорных сетей ионосферных КВ радиолиний диагностики и передачи информации, моделируя сигналы с помехами, дисперсией и изменчивостью каналов через INET. Ключевые настройки: мобильность для стационарных узлов с координатами; радиоконфигурация с интерфейсом и задание необходимых режимов работы (частота, полоса, мощность, дальность для multi hop, битрейт, преамбула, заголовок), чувствительность приемника, пороговые значения отношения сигнал/шум, модель ошибок принятого сообщения; MAC (Medium Access Control) с АСК (механизм подтверждений), режим полудуплекса, задание таймаутов и слотов против коллизий; очереди пакетов с заданной емкостью; потери в ионосфере, скорость передачи информации, маршрутизация с интервалами приветствий, потерями, диаметром и повторами для ad-hoc; реализация программ уровня приложения для генерации и обработки данных с заданными параметрами: целевые узлы, порты, длина пакетов, интервалы отправки и время старта для моделирования многоцелевого трафика. Сбор и анализ статистики метрик, включая количество пакетов, задержки, количество hop, маршруты, параметры MAC-уровня и сетевого уровня, с логированием данных для последующего анализа.

Задавалась следующая конфигурация модели. Центральная частота 14,1 МГц с полосой пропускания 3 кГц; модель распространения радиосигнала LogNormalShadowing с параметром затухания $\alpha = 1,81$ и стандартным отклонением $\sigma = 4,1$ дБ учитывала флуктуации сигнала, характерные для средневозмущенных ионосферных каналов. Скорость распространения 3×10^8 м/с, фоновый шум -150 дБм при полосе 3 кГц. Мощность передатчиков варьировалась от 1,7 кВт (г. Йошкар-Ола) до 3,9 кВт (о. Кипр), дальность связи – от 1700 км (г. Москва) до 4500 км (о. Кипр). Чувствительность приемников от -106 дБм (о.Кипр) до -134 дБм (пгт.Диксон), пороги SNIR – от 1 до 6 дБ.

Методика эксперимента в рамках исследования сенсорной диагностики ионосферных КВ радиолоний была выстроена с учетом специфики распространения коротковолновых сигналов на больших дистанциях и высокой изменчивости среды. Центральным элементом моделирования стал протокол AODV, адаптированный под особенности КВ-диапазона. В отличие от традиционных реализаций, ориентированных на мобильные и локальные беспроводные сети, в данной конфигурации были заданы увеличенные интервалы обмена служебными сообщениями и более устойчивые параметры маршрутизации. Так, интервал между HELLO-сообщениями составлял 45 секунд – на порядок больше, чем в стандартных реализациях, что позволило снизить нагрузку на канал при сохранении достоверности топологии сети. Диаметр сети был установлен на уровне десяти узлов, а время обхода маршрутов – десять секунд. Для компенсации замираний сигнала и периодов отсутствия связи количество повторных запросов маршрутов (RREQ) увеличено до шести, при ограничении скорости их генерации десятью запросами в единицу времени.

Особое внимание в исследованиях уделялось каналному уровню, где был реализован протокол CSMA/CA с параметрами, адаптированными под условия ионосферной связи. Для различных географических пунктов использовались индивидуальные настройки временных интервалов: SIFS (Short Interframe Space) варьировался от 25 мс для центрального узла (г. Москва) до 55 мс для дальних пунктов (г. Иркутск), DIFS (Distributed Interframe Space) – от 70 до 110 мс, а длительность временного слота – от 15 до 35 мс. Таймауты подтверждения приёма (ACK) изменялись в диапазоне от 1500 до 3500 мс, что отражало реальные задержки распространения сигналов по трассам протяжённостью до нескольких тысяч километров. Емкость очередей передачи также зависела от роли узла в сети: от 100 пакетов для периферийных станций (о Кипр) до 200 пакетов для центрального узла (г. Москва), что обеспечивало баланс между буферизацией и скоростью реакции сети на изменения трафика.

На прикладном уровне использовались средства протокола UDP, реализованные через приложения UdpBasicApp и UdpSink, обеспечивавшие передачу диагностических сообщений различного размера – от 40 до 100 байт – с интервалами от 50 до 250 секунд в зависимости от географического положения узлов. IP-адресация выполнялась в пределах подсети 10.0.1.0/16, что обеспечило гибкое моделирование структуры сети и взаимодействия между пунктами.

Имитационное моделирование, проведённое в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET, охватывало временной интервал 5000 секунд, в течение которого было обработано более 370 тысяч событий. За это время выполнено свыше десяти тысяч передач и около сорока тысяч приёмов

сигналов, а также проведены десятки тысяч вычислений помех и решений о приёме, отражающих взаимодействие сигналов и шумов в радиосреде. Высокая эффективность эширования – 85,4% для решений о приёме и 66,7% для расчётов помех – подтвердила оптимизацию вычислительных процессов и адекватность модели.

Размер пакетов маршрутизации RREQ на сетевом уровне составил 52 байта (IPv4 – 20 байт, UDP – 8 байт, AODV – 24 байта), а с учётом заголовков MAC и PHY (Physical Layer) – 83 байта. Время распространения запросов маршрутов варьировалось от 376 до 690 миллисекунд в зависимости от расстояния между узлами, что соответствует задержкам, характерным для КВ-связи при дальностях в тысячи километров. Среднее значение hop count не превышало единицы в фазе обнаружения маршрутов, что указывает на эффективность широковещательной рассылки и стабильность прямых каналов между большинством узлов.

Распределение успешной доставки пакетов продемонстрировало закономерную неравномерность, отражающую зависимость качества связи от протяжённости трассы и характеристик среды. Центральный узел (г. Москва) принимал до восьми пакетов, региональный ретранслятор (г. Йошкар-Ола) — до пятнадцати, в то время как для удалённых станций (пгт. Диксон, г. Иркутск) наблюдалось снижение доставляемости, обусловленное значительными потерями на трассе и замираниями. Диапазон идентификаторов маршрутов (reqId от 4 до 20) и порядковых номеров пакетов (от 2 до 15) подтвердил стабильность функционирования сети и отсутствие избыточной сигнализации, что указывает на адекватность выбранных параметров повторных попыток маршрутизации и канального взаимодействия.

Показано, что предложенная методика моделирования позволила комплексно оценить взаимодействие уровней сетевой архитектуры при передаче диагностической информации в условиях ионосферных КВ-каналов, выявить ключевые зависимости между параметрами AODV и CSMA/CA и подтвердить эффективность разработанных алгоритмов маршрутизации для распределённых сенсорных систем диагностики.

4 Натурное экспериментальное исследование фрагмента сети с реализацией одновременной диагностики и безошибочной передачи информации активным сенсором ПГТУ

Полевые испытания сегмента сети с функцией параллельной диагностики и передачи данных выполнены на коротковолновой ионосферной радиолонии протяженностью 80 км. Предварительные итоги проведенных исследований были представлены в работах [10, 11]. В ходе эксперимента планировалось задействовать все частотные каналы, входящие в

Структурная схема эксперимента КВ радиолонии 80 км



Рис. 6. Структурная схема эксперимента и используемого оборудования

спектр, выделенный для зондирования ионосферного радиоканала. Использование циклически передаваемого сообщения дало возможность на основании полученных экспериментальных данных сформировать битовую матрицу, в которой каждая строка соответствовала номеру переданного сообщения и его рабочей частоте. В то же время столбцы матрицы содержали оценочные значения битов, теоретически совпадающие между собой. Однако влияние канальных помех вызывало искажения, устранение которых осуществлялось с применением методов математической статистики, в частности, мажоритарного принципа.

Анализ данных выявил, что для частотных компонент, несущих полезный сигнал либо характеризующихся недостаточным уровнем интенсивности, регистрируются ошибочные битовые значения, что определило актуальность исследования методов повышения достоверности передачи информации. Результаты описанных полевых испытаний [3, 5], подтверждают эффективность данного подхода.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рисунке 6. Проведение сеансов передачи данных осуществлялось в сентябре 2023 года по NVIS-трассе, проложенной по маршруту г. Йошкар-Ола – озеро Яльчик, его протяженность составляет порядка 80 км.

В качестве антенного блока в передающем пункте (г. Йошкар-Ола) использовался широкополосный горизонтальный диполь АН-710. В пункте приема (озеро Яльчик) была установлена аналогичная антенная система. Комплекс сенсорной диагностики линии связи и передачи телеграфных сообщений посредством сигнала FMCW-FSK [5] был реализован на основе программно-конфигурируемой платформы USRP (Universal Software Radio Peripheral) [3, 7].

Формирование передаваемых сигналов, а также обработка поступающих данных выполнялись с применением специализированного программного обеспечения и ЭВМ. В основе научной новизны работы лежит разработка оригинальных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для синтеза сигналов и их цифровой обработки.

Эти алгоритмы реализованы в среде GNU Radio версии 3.10.1.1, работающей под управлением Ubuntu 22.04.3 LTS, что обеспечивает гибкость конфигурации, адаптацию параметров сигналов к различным режимам работы и возможность проведения экспериментальных исследований с высокой точностью.

Как уже отмечалось, аппаратная часть экспериментального стенда включала универсальный радиомодуль USRP-N210, обеспечивавший выполнение цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразований, а также функций цифрового преобразования частоты (DUC и DDC). Для реализации этих операций применялась ЭВМ, оснащенная гигабитным сетевым интерфейсом.

Передаваемый сигнал проходил усиление при помощи усилителя LZY-22+, обеспечивающего выходную мощность до 10 Вт. Изменение частоты LFMCW-сигнала происходило со скоростью 50 кГц/с при установленной битовой скорости 50 бит/с, что обеспечивало стабильность модуляции и высокую точность передачи данных.

Результаты зондирования, полученные в ходе эксперимента, упорядочивались по частоте для смежных каналов с полосой 20 кГц, после чего для каждого из них вычислялось

отношение сигнал/шум (в дБ). Визуализация параметров зондирования (ПЗМ) позволила получить наглядное представление о частотных зависимостях и временных задержках принимаемых мод, что дало возможность более детально оценить характеристики исследуемого радиоканала [7].

Ширина полосы, приходящаяся на один информационный бит, составляла 1 кГц. Один символ передаваемого сообщения содержал 8 бит и занимал полосу 8 кГц. Таким образом, сообщение длиной 16 символов охватывало в частотной области диапазон 128 кГц. Начальная и конечная частоты несущего ЛЧМ-сигнала составляли соответственно 2 и 10 МГц. Продолжительность одного сообщения, циклически повторяемого 62 раза в диапазоне 2-10 МГц, достигала 160 с.

В ходе экспериментов было передано и принято телеграфное сообщение "test message!!!" и сохранено в памяти ЭВМ, при этом декодированные символы сохранялись для последующего анализа достоверности передачи.

Обработка экспериментальных данных показала, что реализованный метод, использующий частотно-временное разнесение сигнала в сочетании с текущей диагностикой канала, позволяет достигать безошибочной передачи малых объемов данных в условиях загрузки помехами NVIS-каналов ионосферной КВ связи. Установлено, что метод частотно-временного разнесения без диагностики канала демонстрирует существенно меньшую эффективность. Предложенный подход рекомендуется для применения в беспроводных сенсорных сетях для обеспечения безошибочной передачи коротких телеграфных сообщений.

4 Выводы

В ходе исследований разработаны методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов с возможностью параллельной высоконадежной передачи данных. Обосновано использование методологии сенсорных сетей в качестве базовой при определении сценариев маршрутизации, протоколов обмена диагностической информацией и управления сетью.

Имитационным моделированием в OMNeT++ подтверждена эффективность предложенных алгоритмов маршрутизации (модифицированный AODV) и адаптированных параметров канального уровня (CSMA/CA) для обеспечения высокой надежности передачи данных в условиях длинных радиолиний, комплекса помех и изменчивости КВ радиоканалов из-за частотно-временной межмодовой дисперсии.

В результате моделирования выявлены ключевые ограничения по дальности и чувствительности узлов, показана эффективность кэширования и широкой передачи RREQ-пакетов. Экспериментально показана возможность реализации фрагмента сети с одновременной диагностикой и безошибочной передачей информации на ионосферной КВ радиолинии протяженностью 80 км.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-19-00145.

Литература

1. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю. Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. №4. С. 90-104.
2. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М. Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 18. С. 10-13.
3. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Лащевский А.Р. Повышение достоверности приема коротких сообщений путем одновременного использования частотно-временного разнесения и сенсорной диагностики // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 6. С. 54-63.
4. Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В., Исаев Н.Р. Метод и алгоритмы автоматического обнаружения сигнала в задаче сенсорной диагностики КВ-радиоканала // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 158-170.
5. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Ведерникова Ю.А., Чернов А.А. Метод синхронизации систем низкоскоростной передачи телеграфных сообщений малого объема на КВ-трассах большой протяженности // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 6-16.
6. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Кислицын А.А. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии

трансионосферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 6. С. 571-578.

7. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Елсуков А.А. Активный и пассивный сенсоры для диагностики квазизенитных ионосферных каналов КВ-связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26. № 4. С. 60-67.
8. Варга А., Хорниг Б. Обзор среды моделирования OMNeT++ // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Т. 38, № 1. С. 60-67. DOI: 10.1145/1416222.1416290.
9. Varga, A., Hornig, B. INET Framework Documentation. Version 4.5.4. OMNeT++ Community. Доступно на: <https://inet.omnetpp.org/docs/index.html>. (Дата обращения: 01.10.2025).
10. Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А., Рябова Н.В. Методология и макет программно-конфигурируемой системы для низкоскоростной передачи информации по ионосферному радиоканалу с высокой надёжностью // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2023. № 3(59). С. 45-57. DOI 10.25686/2306-2819.2023.3.45. EDN ZWKIGO.
11. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Лащевский А.Р. Повышение достоверности приема коротких сообщений путем одновременного использования частотно-временного разнесения и сенсорной диагностики // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29, № 6. С. 54-63. DOI 10.18127/j5604128-202406-07. EDN GZTMUX.

SENSOR DIAGNOSTICS OF IONOSPHERIC SHORT-WAVE RADIO LINES AND NETWORK APPROACHES TO TRANSMITTING RECEIVED INFORMATION

Dmitry V. Ivanov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, IvanovDV@volgatech.net
Vladimir A. Ivanov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, IvanovVA@volgatech.net
Natalia V. Ryabova, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, RyabovaNV@volgatech.net
Nikita A. Konkin, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, KonkinNA@volgatech.net
Andrey A. Chernov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, ChrenovAA@volgatech.net

Abstract

This paper develops methods and tools for sensor diagnostics of ionospheric HF radio channels and the simultaneous, highly reliable transmission of the acquired information. To analyze the operation of distributed sensor networks, simulation modeling was conducted in the OMNeT++ environment using the INET framework. An ad-hoc network model was implemented using the AODV protocol with five diagnostic points and varying radio path lengths. The simulation confirmed the effectiveness of the developed routing algorithms and channel-layer parameters for highly reliable data transmission in the presence of interference and variability of HF channels. Devices for diagnostics and highly reliable data transmission developed at VSTU for these purposes using software-defined technologies are presented. A network fragment for an 80-km radio link was experimentally implemented.

Keywords: HF radio channel, diagnostic, ionosphere, sensor network, information transfer, routing algorithm, data exchange protocol, simulation modeling, OMNeT++

References

- [1] A. S. Dmitriev, L. V. Kuzmin, and V. Yu. Yurkin, "Ultra-wideband wireless sensor networks based on chaotic radio pulses," *Applied Nonlinear Dynamics*, vol. 17, no. 4, pp. 90-104, 2009.
- [2] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and M. M. Petrosyan, "Experimental implementation of differentially coherent wireless communication scheme based on chaotic radio pulses," *Technical Physics Letters*, vol. 48, no. 18, pp. 10-13, 2022.
- [3] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. R. Lashchevskii, "Enhancing the reliability of short message reception by simultaneously using frequency-time spreading and sensor diagnostics," *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 54-63, 2024.
- [4] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Elsukov, V. V. Ovchinnikov, and N. R. Isaev, "Method and adaptive algorithms for narrow-band interferences mitigation and automatic signal detection in the problem of sensor diagnosis of multiple hf radio channels," *Radiotekhnika (Radioengineering)*, vol. 87, no. 12, pp. 158-170, 2023.
- [5] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, Yu. A. Vedernikova, and A. A. Chernov, "Synchronization of radio engineering communication systems and sounding of ionospheric high-frequency radio channels," *Radiotekhnika (Radioengineering)*, vol. 87, no. 12, pp. 6-16, 2023.
- [6] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. A. Kislitsyn, "Ensuring maximum bandwidth of satellite radio communication systems under intra-mode dispersion of transionospheric radio channels," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 571-578, 2023.
- [7] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. A. Elsukov, "Active and passive sensors for diagnostics quasi-zenith ionospheric hf communication channels," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 60-67, 2023.
- [8] A. Varga and B. Hornig, "An overview of the OMNeT++ simulation environment," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 1, pp. 60-67, 2008, doi: 10.1145/1416222.1416290.
- [9] A. Varga and B. Hornig, INET Framework Documentation, Version 4.5.4, OMNeT++ Community, 2025. [Online]. Available: <https://inet.omnetpp.org/docs/index.html>. [Accessed: Oct. 1, 2025].
- [10] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, A. A. Elsukov, and N. V. Ryabova, "Methodology and prototype of a software-defined system for low-rate data transmission over ionospheric radio channels," *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, no. 3(59), pp. 45-57, 2023, doi: 10.25686/2306-2819.2023.3.45.
- [11] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. R. Lashchevskii, "Enhancing the reliability of short message reception by simultaneously using frequency-time spreading and sensor diagnostics," *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 54-63, 2024, doi: 10.18127/j5604128-202406-07.

Information about authors:

Dmitry V. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Vice-Rector for Research, research interests – modeling of technical systems, broadband signals, radio wave propagation, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-3609-1157

Vladimir A. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, research interests – ionosphere, radio wave propagation, modeling, broadband signals, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-9860-4771

Natalia V. Ryabova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Communications, research interests – information and telecommunication systems, ionosphere, radio wave propagation, forecasting, modeling, adaptive systems, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-3515-4750

Nikita A. Konkin, Senior Lecturer, Department of Radio Engineering and Communications, research interests – analysis of ionospheric remote sensing data, machine learning, neural networks, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0001-7052-748X

Andrey A. Chernov, Candidate of Technical Sciences, Department of Radio Engineering and Communications, research interests – synchronization of communication and sensing systems, machine learning, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

ОЦЕНКА КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ БЛОЧНЫХ МАТРИЦ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ПАКЕТОВ ОШИБОК

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-23-32

Вересова Алина Максимовна,

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, a.veresova@guap.ru

Manuscript received 11 August 2025;
Accepted 14 October 2025

Тюрликов Андрей Михайлович,

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, turlikov@guap.ru

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства
науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение
№ FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения
помехозащищённых систем космической и спутниковой связи,
относительной навигации, технического зрения и
аэрокосмического мониторинга"*

Богатырев Владимир Анатольевич,

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Ключевые слова: коды с малой плотностью проверок
на чётность, блочно-перестановочная конструкция,
квазициклические коды, пакеты ошибок, каналы с памятью

В статье рассматривается задача оценки помехоустойчивости некоторых кодов с малой плотностью проверок на чётность, проверочная матрица которых составлена из блоков различной природы. Рассмотрен обобщённый подход к определению корректирующей способности кода для случая, когда ошибки представляют собой комбинацию пакетов и независимых ошибок заданной кратности, основанный на комбинаторном покрытии множества ошибочных позиций слова. Целью данной работы является анализ корректирующей способности ансамблей блочно-перестановочных кодов по сравнению с широко используемыми блочно-циркулянтными кодами, а также их известных подклассов для исправления однократных пакетов ошибок. Известно, что для всех этих конструкций максимально возможная длина исправляемого одиночного пакета строго меньше размера блока, таким образом, если размер блока и максимальная длина отличаются на единицу, такие коды оптимальны в рамках данных конструкций. Проведена экспериментальная оценка длины исправляемого одиночного пакета для кодов Гилберта, их детерминированного и вероятностного расширения, ансамбля блочно-циркулянтных кодов, а также ансамбля блочно-перестановочных кодов. Показано, что в ансамбле блочно-перестановочных кодов находятся оптимальные для блочных конструкций коды при любом размере блока. Этим свойством не обладают другие рассмотренные конструкции: для блочно-циркулянтных кодов, включая расширения кода Гилберта, оптимальные коды найдены лишь для нечётных значений размера блока. При этом вероятность выбора из ансамбля кода с максимальной корректирующей способностью выше для расширенного кода Гилберта, чем для общего блочно-циркулянтного кода. Рассмотренный детерминированный расширенный код Гилберта показывает сравнительно небольшую корректирующую способность и оптимален только при простых значениях размера блока. Результаты работы могут быть использованы для построения кодовых схем и повышения достоверности передачи в каналах со сложной структурой шума, описываемой группированными ошибками.

Информация об авторах:

Вересова Алина Максимовна, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи, старший преподаватель, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0002-3792-9249

Тюрликов Андрей Михайлович, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи, заведующий кафедрой, профессор, доктор технических наук, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0001-7132-094X

Богатырев Владимир Анатольевич, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Кафедра информационной безопасности, профессор, доктор технических наук, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0003-0213-0223

Для цитирования:

Вересова А.М., Тюрликов А.М., Богатырев В.А. Оценка корректирующей способности конструкций на основе блочных матриц при исправлении пакетов ошибок // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 23-32.

For citation:

A. M. Veresova, A. M. Turlikov, V. A. Bogatyrev, "Estimation of burst error correcting capability for code constructions based on matrices from blocks", T-Comm, 2025, vol. 19, no.11, pp. 23-32. (in Russian)

Введение

С развитием современных систем инфокоммуникаций к ним предъявляются всё возрастающие требования к их надёжности, производительности и помехоустойчивости. Задача повышения вероятности безошибочной передачи сообщений решается комбинированием методов с использованием обратной связи (там, где это возможно) и непосредственного (прямого) исправления ошибок на приёмнике без переспроса. В первом случае требуется механизм обнаружения некорректно принятых пакетов, что решается обычно с помощью добавления контрольной суммы, вычисленной на основе циклического избыточного кода (CRC, cyclic redundancy check), и при необходимости осуществляется переспрос и повторная передача ошибочного пакета, либо, в гибридном режиме, дополнительной избыточности для новой попытки коррекции [1, 2]. Эти методы используются на канальном или транспортном уровнях сети. Во втором случае используется помехоустойчивый код, делающий попытку исправления ошибок в принятых на физическом уровне сети символов [3, 4]. В данной статье рассматривается задача прямого исправления ошибок.

Для построения эффективных методов помехоустойчивого кодирования и декодирования требуется использование адекватной модели искажения информации в канале связи. К. Шенноном было показано существование предельной величины скорости безошибочной передачи, называемой пропускной способностью канала, зависящей только от свойств канала и при которой возможно обеспечить сколь угодно малую вероятность ошибки. Необходимо отметить, что под каналом связи здесь понимается именно математическая модель, описывающая переходные вероятности между входными и выходными последовательностями или символами.

Классическая теория помехоустойчивого кодирования обычно рассматривает модели, в которых ошибки происходят независимо. Современные методы кодирования предлагают классы кодов с вычислительно эффективными декодерами, практически вплотную подходящие к пропускной способности каналов с независимыми ошибками – в первую очередь, канала с аддитивным белым гауссовским шумом. В этой связи следует в первую очередь отметить классы полярных кодов [5-7] и кодов с малой плотностью проверок на чётность (МППЧ) [8; 9].

Однако модели с независимыми ошибками зачастую неадекватны процессам, приводящим к искажению символов в реальных каналах связи. Современным подходом для адаптации таких моделей к практическим ситуациям является использование перемежения, что приводит к увеличению задержек обработки информации как на передатчике, так и на приёмнике, однако помимо этого, известно, что такая адаптация увеличивает разрыв между практическими характеристиками надёжности и теоретическими, задаваемыми пропускной способностью канала. Таким образом, дальнейшее улучшение характеристик систем связи возможно, если система помехоустойчивого кодирования ориентирована на исправление ошибок, специфичных для канала связи.

Статистическая зависимость ошибок в канале обычно называется памятью, и приводит к формированию сгруппированных ошибок, называемых пакетами [3, 10, 11]. В теории кодирования классическими подходами для исправления

пакетов ошибок являются коды Рида-Соломона, использование которых приводит к сравнительно вычислительно ёмким процедурам декодирования в недвоичных полях, циклические коды Файра, которые являются высокоскоростными и не обладают достаточной гибкостью в выборе параметров, или использование итеративных конструкций, также вычислительно ресурсозатратных и недостаточно гибких [12, 13]. В последние годы рассматривались возможности исправления пакетов ошибок с помощью полярных кодов [14, 15], а также МППЧ-кодов [16-18]. Однако в этих статьях мало внимания уделено анализу корректирующих свойств соответствующих кодовых конструкций и в основном рассматриваются методы декодирования и связанные с ними вероятности ошибки. Кроме того, не анализируется конструкция МППЧ-кодов, основанная на произвольных перестановках.

В настоящей статье рассматривается корректирующая способность некоторых наиболее интересных классов МППЧ-кодов, основанных на блоках перестановок. Статья организована следующим образом. Так как описание векторов ошибок сложной структуры, а также само понятие корректирующей способности кода при исправлении таких ошибок не является общепринятым, сначала вводится понятие обобщённой корректирующей способности, на основании которого формулируется критерий помехоустойчивости как максимальной длины исправляемого пакета при заданных кратностях пакетов и независимых ошибок. Далее проводится экспериментальная оценка максимальной длины исправляемого одиночного пакета для блочно-циркулянтных кодов, их подклассов: кодов Гилберта, детерминированных и вероятностных расширенных кодов Гилберта, а также для блочно-перестановочных кодов общего вида.

Обобщённая корректирующая способность линейного кода

Линейный (n, k) -код представляет собой k -мерное подпространство n -мерного линейного векторного пространства над конечным полем, далее мы ограничиваемся рассмотрением только двоичных кодов. Базис \mathbf{G} этого пространства – $(k \times n)$ -матрица полного ранга – называется порождающей матрицей, а базис \mathbf{H} ортогонального пространства – проверочной матрицей. Матрица \mathbf{H} имеет размерность $r \times n$, где $r = n - k$ – число избыточных символов, и для неё выполняется $\mathbf{GH}^T = \mathbf{0}$. Линейный код может быть задан как с помощью порождающей, так и с помощью проверочной матрицы. Необходимо отметить, что для классов МППЧ-кодов, рассматриваемых далее, проверочная матрица часто имеет дополнительные линейно зависимые строки, что обусловлено её конструкцией, таким образом, число избыточных символов кода $r = \text{rank } \mathbf{H}$ несколько меньше количества строк в \mathbf{H} , этой разницей мы будем пренебрегать.

При исправлении независимых ошибок важнейшей характеристикой помехоустойчивости является количество исправляемых ошибок t , которое часто характеризуется величиной минимального расстояния Хемминга $d_0 = 2t + 1$ рассматриваемого кода. Определить корректирующую способность (или минимальное расстояние) можно как по порождающей матрице, используя некоторый вариант перебора по кодовым словам, так и по проверочной матрице.

Если минимальный вес Хэмминга кодового слова \mathbf{a} равен $W(\mathbf{a}) = d_0$, то в проверочной матрице имеется комбинация из d_0 линейно зависимых столбцов, и любые $d_0 - 1$ столбцов линейно независимы. С точки зрения корректирующей способности, это означает, что никакие две комбинации из t столбцов не должны давать одинаковый синдром, то есть любые $2t$ столбцов проверочной матрицы образуют подматрицу полного ранга. Таким образом, процедура определения корректирующей способности кода может заключаться в нахождении максимального значения t , для которого ранг всех возможных подматриц из $2t$ столбцов является полным.

На основании этого легко можно получить, что $d_0 \leq n - k + 1 = r + 1$, и это неравенство известно как граница Синглтона. Однако такой перебор экспоненциален, и более того, определение минимального расстояния кода в общем случае – NP-трудная задача. Заметим, что параметр корректирующей способности t следует рассматривать в следующем смысле: код может исправить любую комбинацию из не более, чем t ошибок, но также некоторые комбинации из более чем t ошибок – конкретный набор этих комбинаций определяется стандартной расстановкой кода [3]. Таким образом, параметр t (или d_0) – это удобный (и реализуемый на практике) способ задания подмножества векторов ошибок, исправляемых кодом, задание же всех таких векторов имеет экспоненциальную сложность.

В случае каналов с памятью дискретная модель ошибок обычно подразумевает введение понятия пакета ошибок. Есть разные подходы к определению пакета ошибок, самым простым из которых является определение пакета как подвектора в векторе ошибок \mathbf{e} , чьи позиции расположены от первого до последнего ненулевого элемента \mathbf{e} , и длина пакета равна длине этого подвектора. При такой трактовке пакет всегда начинается и всегда заканчивается ненулевым элементом. Существуют и другие подходы к определению пакета ошибок. В частности, такое определение не может быть обобщено на случай многократных пакетов, а также компаундных ошибок, сочетающих пакеты и независимые ошибки. Зададим определение структуры вектора ошибки на основе подхода Э. М. Габидулина, использованного при задании класса комбинаторных метрик [19]. Пусть $\mathbb{N}_n = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество номеров позиций вектора из n элементов, тогда носитель вектора $\text{supp}(\mathbf{e}) = \{i \mid e_i \neq 0, i \in \mathbb{N}_n\}$ – множество ненулевых позиций вектора \mathbf{e} .

Для некоторого множества A будем говорить, что оно покрывает вектор ошибки \mathbf{e} , если $\text{supp}(\mathbf{e}) \subseteq A$, т.е. все ненулевые позиции \mathbf{e} содержатся в A . Рассмотрим множество $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_s\}$, $A_i \subseteq \mathbb{N}_n$ такое, что $\bigcup_{i=1}^s A_i = \mathbb{N}_n$. Пусть для некоторого b

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_b &= \{B_1, B_2, \dots, B_{n-b+1}, T_1, T_2, \dots, T_n\}, \\ A_1 &= B_1 = \{1, 2, \dots, b\}, \\ A_2 &= B_2 = \{2, 3, \dots, b+1\}, \\ &\dots, \\ A_{n-b+1} &= B_{n-b+1} = \{n-b+1, n-b+2, \dots, n\}, \\ A_{n-b+2} &= T_1 = \{1\}, \\ A_{n-b+3} &= T_2 = \{2\}, \\ &\dots, \\ A_{2n-b+1} &= T_n = \{n\}, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $s = 2n - b + 1$ и дополнительные обозначения подмножеств B_i и T_i введены для удобного соответствия пакетам и независимым ошибкам.

Будем считать, что величина $z = \{0, 1\}$ принимает значения нуля и единицы булеана A , т.е. справедливо $0A = \emptyset$ и $1A = A$. Пусть $\mathcal{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_s)$, $z_i \in \{0, 1\}$, и для $1 \leq i \leq j \leq n$ обозначим через $z_i^j = (z_i, z_{i+1}, \dots, z_j)$ подвектор \mathcal{Z} из подряд идущих элементов от i до j . Далее, пусть $Z_1 = z_1^{n-b+1}$, $Z_2 = z_2^{n-b+2}$. Тогда будем говорить, что вектор ошибки \mathbf{e} обрзован b_n -кратными пакетами длиной b и t_n -кратными независимыми ошибками, если существует такой вектор $\mathcal{Z} = (Z_1 \mid Z_2)$, где $W(Z_1) = b_n$, $W(Z_2) = t_n$, для которого

$$\text{supp}(\mathbf{e}) \subseteq \bigcup_{i=1}^s z_i A_i = \left[\bigcup_{i=1}^{n-b+1} z_i B_i \right] \cup \left[\bigcup_{i=n-b+2}^s z_i T_i \right] = \left[\bigcup_{i \in \text{supp}(Z_1)} B_i \right] \cup \left[\bigcup_{i \in \text{supp}(Z_2)} T_i \right], \quad (2)$$

другими словами, если все ненулевые позиции вектора ошибки \mathbf{e} могут быть покрыты набором из не более, чем b_n множеств B_i (пакетов длиной, не превышающей b) и t_n множеств T_i (независимых одиночных ошибок), причём эти множества могут пересекаться. Заметим, что при заданном правиле (1) построения множеств B_i и T_i одному и тому же вектору ошибок могут соответствовать разные покрытия, т.е. разные векторы \mathcal{Z} . Например, носителем вектора $\mathbf{e} = (0010100)$ является $\text{supp}(\mathbf{e}) = \{3, 5\}$. При $b = 2$, $b_n = 1$, $t_n = 1$ это множество является подмножеством как объединения $B_3 \cup T_5$, так и $T_3 \cup B_5$, существуют и другие варианты объединений, дающих покрытие.

Таким образом, рассмотренное множество \mathcal{A}_b не может быть использовано для введения нормы вектора и меры расстояния (метрики), как это делал Э. М. Габидулин для других вариантов задания \mathcal{A} в [19], в связи с тем, что как норма, так и расстояние являются функциями, а отображение из \mathbf{e} в \mathcal{Z} неоднозначно. Более того, для некоторых векторов \mathbf{e} вообще не существует вектора \mathcal{Z} , для которого выполнялось бы (2). Обозначим через $\mathcal{Z}(\mathbf{e}, b_n, t_n, \mathcal{A}_b)$ множество векторов \mathcal{Z} , для которых выполняется (2) для заданных \mathbf{e} , b_n , t_n , \mathcal{A}_b (это означает и задание b).

Таким образом, (2) может рассматриваться как задача распознавания, результатом которой является ответ «да» или «нет» на вопрос: «является ли множество $\mathcal{Z}(\mathbf{e}, b_n, t_n, \mathcal{A}_b)$ непустым?». Данная задача может быть основой для определения обобщённой корректирующей способности кода, так как, как мы видели ранее, корректирующая способность задаёт некоторое подмножество исправляемых вектором ошибок.

Тогда обобщённая корректирующая способность кода может быть задана как параметр, определяющий при фиксированных b_n , t_n , и \mathcal{A}_b множество из всех таких векторов ошибок \mathbf{e} , для которых задача распознавания (2) имеет ответ «да» и все такие векторы лежат в разных смежных классах (и следовательно, исправляются кодом).

Очевидно, такое множество векторов ошибок может формировать некоторое подмножество лидеров смежных классов. Например, при $b_n = 0$ множество \mathcal{A}_b не зависит от b и состоит из $\mathcal{A} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, и $\mathcal{Z}(\mathbf{e}, 0, t_n, \mathcal{A}) \neq \emptyset$ для любого \mathbf{e} , для которого $W(\mathbf{e}) \leq t_n$, тогда максимально возможное t_n , при котором задача распознавания (2) имеет ответ «да» только для векторов из разных смежных классов, совпадает с рассмотренной ранее «классической» корректирующей способностью кода при исправлении независимых ошибок.

Пусть теперь $t_n = 0, b_n = 1$, тогда $\mathcal{A}_b = \{B_1, B_2, \dots, B_{n-b+1}\}$, и $\mathcal{Z}(\mathbf{e}, 1, 0, \mathcal{A}_b) \neq \emptyset$ для всех векторов, образующих однократный пакет длиной, не превышающей b . Максимизация по b даст «классическую» пакетную корректирующую способность, т.е. максимальную длину произвольного пакета, исправляемого кодом.

В зависимости от решаемых задач, можно фиксировать одни параметры из набора b_n, t_n, \mathcal{A}_b и определять через них другие. Мы будем рассматривать вариант, при котором для заданных b_n и t_n , т.е. кратностях пакетов и независимых ошибок, максимизируется длина исправляемого пакета.

Пусть $\mathcal{E}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b) = \{\mathbf{e} : \mathcal{Z}(\mathbf{e}, b_n, t_n, \mathcal{A}) \neq \emptyset\}$ – множество векторов, для которых задача (2) имеет ответ «да». Пусть \mathcal{C} – линейный (n, k) -код с проверочной матрицей \mathbf{H} . Любые два вектора \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 не могут быть (одновременно) исправлены кодом тогда и только тогда, когда $\mathbf{e}_1 \mathbf{H}^T = \mathbf{e}_2 \mathbf{H}^T$. Пусть

$$\mathcal{E}_{\mathcal{C}}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b) = \{\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots\} \subseteq \mathcal{E}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b) : (\forall i \neq j) \mathbf{e}_i \mathbf{H}^T \neq \mathbf{e}_j \mathbf{H}^T\}$$

– множество таких векторов из $\mathcal{E}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b)$, которые лежат в разных смежных классах стандартной расстановки кода \mathcal{C} . Тогда обобщённой (или совместной) (b_n, t_n) -корректирующей способностью кода будем называть величину

$$b_0 = \max_{\mathcal{E}_{\mathcal{C}}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b) \neq \emptyset} \{b\},$$

т.е. максимальную длину пакета b_0 , при которой все векторы, образующие b_n -кратные пакеты длиной b_0 и t_n -кратные независимые ошибки, лежат в разных смежных классах.

Процедура определения b_0 может быть построена, используя идеи, описанные ранее для определения корректирующей способности кода по проверочной матрице. В случае однократных пакетов, аналогично исправлению независимых ошибок, способность кода исправить одиночный пакет длиной b означает, что любые два набора из b подряд идущих столбцов проверочной матрицы образуют подматрицу полного ранга, и процедура также заключается в определении ранга всех возможных подматриц соответствующей конфигурации. Вычислительная сложность такой процедуры полиномиальна. Максимальная длина исправляемого пакета удовлетворяет границе Рейгера: $b \leq (n - k) / 2 = r / 2$.

Легко обобщить описанные ранее процедуры для определения совместной корректирующей способности. Никакие два вектора \mathbf{e}_i и \mathbf{e}_j , входящие в $\mathcal{E}_{\mathcal{C}}(b_n, t_n, \mathcal{A}_b)$, не могут иметь одинаковый синдром, это эквивалентно тому, что

подматрица, составленная из столбцов с номерами носителя вектора $\mathbf{e}_i \oplus \mathbf{e}_j$, не может иметь линейно зависимые столбцы, т.е. должна иметь полный ранг. Это можно проверить, рассматривая ранги подматриц из $2b_n$ блоков по b подряд идущих столбцов (для некоторого заданного b) и $2t_n$ отдельных стоящих столбцов и максимизируя b при условии отсутствия подматриц неполного ранга.

Алгоритм и некоторые результаты его выполнения приведены в [20], приведём здесь псевдокод алгоритма для полноты изложения. В псевдокоде используются следующие обозначения. Пусть \mathbf{H} – проверочная матрица кода, b_n и t_n – кратности пакетов и отдельных ошибок, соответственно, b – некоторое натуральное число. Обозначим через $H_{2b_n}^{(b)}$ множество возможных позиций $2b_n$ пакетов длиной b , каждый пакет включает в себя b подряд идущих номеров позиций от 1 до n . Для ускорения работы алгоритма можно считать, что эти множества не пересекаются, т.е. пакеты не накладываются друг на друга – это включает в себя их пересечение как частный случай, но уменьшает число шагов алгоритма. Далее, пусть T_{2t_n} – множество из $2t_n$ произвольных позиций, не вошедших в $H_{2b_n}^{(b)}$. Наконец, через $\mathbf{H}(\alpha, \beta)$ обозначим подматрицу проверочной матрицы \mathbf{H} , составленную из столбцов с номерами из объединения множеств α и β . Псевдокод алгоритма приведён ниже.

ПРОЦЕДУРА $b_0 = \text{FindBMax}(b, \mathbf{H}, b_n, t_n)$

ВХОД: величина $b \geq b_0$, проверочная $(r \times n)$ матрица \mathbf{H} , кратность пакетов b_n , кратность ошибок t_n

ВЫХОД: обобщённая корректирующая способность b_0 кода.

1. Если $b = 0$, вернуть 0.
2. Для всех $\alpha \in H_{2b_n}^{(b)}$
3. Для всех $\beta \in T_{2t_n}$
4. Если $\text{rank}(\mathbf{H}(\alpha, \beta)) < 2(b_n b + t_n)$
5. Вернуть $b_0 = \text{FindBMax}(b - 1, \mathbf{H}, b_n, t_n)$.
6. Вернуть b .

Алгоритм. Определение обобщённой корректирующей способности линейного кода

Как можно видеть из приведённого псевдокода, алгоритм состоит в вызове рекурсивной процедуры, которой передаётся некоторое начальное значение b , являющееся верхней границей для b_0 , и при каждом рекурсивном вызове значение b уменьшается на единицу, пока не станет равным b_0 – тогда условие в строке 4 внутри циклов в строках 2 и 3 никогда не выполнится, это свидетельствует о том, что текущее значение $b = b_0$.

Процедура идёт от большего значения b к меньшему, так как можно ожидать, что при больших $b > b_0$ мы достаточно быстро будем находить подматрицы неполного ранга и переходить к следующему значению b . Конечно, максимально возможным значением для b является n , но для ускорения работы алгоритма желательно приблизить значение b к искомому b_0 , гарантированно сохраняя условие верхней границы. Воспользуемся для этого некоторой модификацией известных границ корректирующей способности.

С точки зрения границ Синглтона и Рейгера, максимальные значения корректирующей способности t и b (для

однократных пакетов) одинаковы, поскольку в одном случае рассматриваются комбинации из $2t$, а в другом – из $2b$ столбцов проверочной матрицы, а максимальный ранг подматрицы \mathbf{H} не может быть больше, чем $\text{rank } \mathbf{H} = r = n - k$. Это сразу даёт границы $2t \leq r$ и $2b \leq r$, что и соответствует границам Синглтона и Рейгера.

В случае совместной корректирующей способности, т.к. мы рассматриваем подматрицы из двух наборов комбинаций b_n пакетов длиной b и t_n ошибок, они содержат $2b_nb + 2t_n$ столбцов, и можно получить обобщённую границу Рейгера: $2b_nb + 2t_n \leq r$. Верхней границей длины пакета в таком случае будет значение

$$b_0 \leq \frac{r - 2t_n}{2b_n}.$$

Величину в правой части неравенства можно использовать как начальное значение b при первом вызове вышеприведённой рекурсивной процедуры. Вычислительная сложность алгоритма определения совместной корректирующей способности определена в работе [20], она зависит от рассматриваемых параметров и полиномиальна при небольших значениях b_n и t_n .

Оценка корректирующей способности блочно-перестановочного кода

Используя подходы, описанные в предыдущем разделе, проведём оценку корректирующей способности некоторых важных классов кодов. Ограничимся рассмотрением наиболее распространённого случая исправления однократных пакетов, т.е. $t_n = 0$, $b_n = 1$.

Одними из широко используемых сегодня кодов являются коды с малой плотностью проверок на чётность (МППЧ). В современных системах связи наибольшее распространение получила конструкция низкоплотных кодов, основанная на блоках — перестановках единичной матрицы. Такие коды описываются при помощи проверочной матрицы \mathbf{H} вида

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \cdots & \mathbf{C}_{1\rho} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \cdots & \mathbf{C}_{2\rho} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{\gamma 1} & \mathbf{C}_{\gamma 2} & \cdots & \mathbf{C}_{\gamma\rho} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

состоящей из $\gamma \times \rho$ блоков. Каждый блок представляет собой $(m \times m)$ -двоичную матрицу, таким образом, длина кода равна $n = \rho m$, а число проверочных символов r несколько меньше числа строк γm в (3), т.к. матрица вида (3) имеет линейно зависимые строки. Обычно при исправлении независимых ошибок используется блочно-циркулянтная конструкция (БЦК), где каждый блок – некоторая степень циркулянта с генератором единичного веса, что совпадает с матрицей циклической перестановки. Такая конструкция задаёт квазициклический код и позволяет упростить процедуры кодирования и декодирования. Иногда рассматривают также циркулянты с генератором большего веса, однако практически во всех современных стандартах связи, использующих МППЧ-коды, в качестве блоков используются матрицы циклической

перестановки, и мы также будем рассматривать только такой вариант БЦК.

Более компактно матрица (3) в случае БЦК может быть представлена с помощью так называемой базовой $(\gamma \times \rho)$ матрицы:

$$\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1\rho} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2\rho} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{\gamma 1} & p_{\gamma 2} & \cdots & p_{\gamma\rho} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь p_{ij} – целое число от 0 до $m - 1$, представляющее собой степень матрицы циклической перестановки, $\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{C}^{p_{ij}}$.

Известны также конструкции на основе использования более общей блочно-перестановочной конструкции (БПК), в которой блоки – перестановки столбцов единичной матрицы общего вида. Очевидно, БЦК является подклассом БПК. Выбор конкретных блоков, как правило, определяется с помощью интенсивного компьютерного моделирования, возможно, направленного при помощи некоторых, порой достаточно сложных эвристик. Некоторые из них используют анализ структуры матрицы и связанного с ней графа Таннера, а также весовые распределения строк и столбцов проверочной матрицы, и для улучшения структуры матрицы иногда используется маскирование матрицы (3) нулевыми блоками.

Как правило, для эффективного исправления независимых ошибок проверочные матрицы должны включать большое число блоков. Обычно число блоков γ в столбце (3) не менее четырёх, и может достигать нескольких десятков, как, например, в кодах стандарта мобильной связи 5G. Число блоков в строке ρ определяется скоростью кода R и может быть примерно оценено как $\rho = \gamma / (1 - R)$.

Возможность применения блочно-циркулянтной конструкции для исправления однократных пакетов ошибок рассматривалась в [21], где было показано, что если не используется маскирование нулевыми блоками, длина однократного исправляемого пакета b_0 не превышает величину $m - 1$. Следовательно, с учётом границы Рейгера $b_0 \leq r/2$ при выборе кодов БЦК для исправления пакетов ошибок информационная избыточность используется более эффективно, если число блоков невелико. Указанная верхняя граница $b_0 \leq m - 1$ справедлива и для БПК.

При наименьшем значении $\gamma = 2$ известны коды Гилберта, являющиеся подклассом БЦК и базовая матрица (4) которых имеет вид

$$\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \cdots & \rho - 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Важно отметить, что в конструкции (5) матрица циклической перестановки \mathbf{C} получена циклическим сдвигом столбцов единичной матрицы влево. Это имеет большое значение для исправления пакетов ошибок, так как при использовании сдвига вправо корректирующая пакетная способность этих кодов резко ухудшается. Это связано с тем, что корректирующая способность кода при исправлении пакетов ошибок связана с подматрицами из подряд идущих столбцов, и если при исправлении независимых ошибок использование эквивалентных МППЧ-кодов, т.е. отличающихся перестановкой

координат кодового слова или столбцов проверочной матрицы, не влияет на дистанционные и спектральные характеристики кода, а также на обычно рассматриваемые структуры графа Таннера, в случае пакетов ошибок эквивалентные коды могут обладать принципиально разными свойствами.

Корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении однократных пакетов ошибок может быть вычислена аналитически с помощью процедуры, описанной в [22]. При $\rho = 3$ длина исправляемого пакета $b = m - 1$, и такие коды лежат на границе Рейгера. Однако с ростом параметра ρ корректирующая способность кодов Гилберта уменьшается примерно линейно до значения около $m/2$, и начиная со значений $\rho \approx m/2$ не изменяется. Корректирующая способность кодов Гилберта для некоторых значений m приведена на рисунке 1.

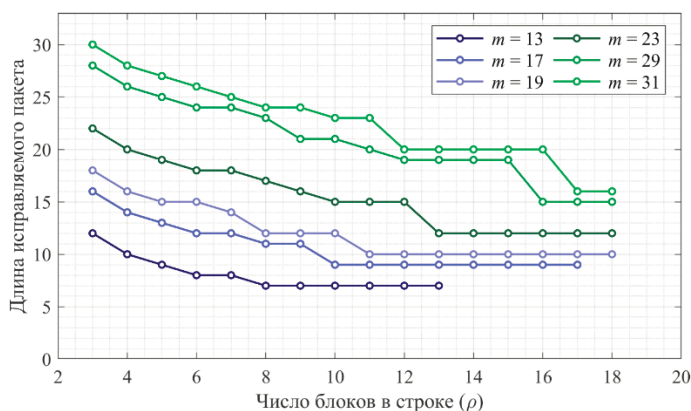


Рис. 1. Корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении однократных пакетов

В [23] предложено обобщение кодов Гилберта для $\gamma = 3$. Базовая матрица таких кодов имеет вид

$$\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \rho-2 & \rho-1 \\ \rho-1 & \rho-2 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Заметим, что конструкции (5) и (6) детерминированы в том смысле, что для заданных параметров ρ и m существует ровно один код Гилберта и его обобщение для $\gamma = 3$.

Конструкция (5) может быть также обобщена до вероятностного ансамбля кодов с базовой матрицей

$$\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \rho-2 & \rho-1 \\ p_0 & p_1 & \dots & p_{\rho-2} & p_{\rho-1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\{p_0, p_1, \dots, p_{\rho-1}\}$ – случайная перестановка чисел от 0 до $\rho - 1$, с условием, что $p_{i+1} - p_i \neq 1$ ни для какого $i = 0, \dots, \rho - 2$. Доказано, что для простых m коды (5) и (6) всегда исправляют пакеты длиной до $m - 1$, что является наилучшей возможной корректирующей способностью для БЦК относительно размера блока, однако для составных значений m корректирующая способность данных кодов неизвестна.

Проведём экспериментальный анализ корректирующей способности при исправлении однократных пакетов для следующих классов кодов:

- расширенные коды Гилберта (6) и (7) с разными размерами блоков (при представлении результатов экспериментов будем обозначать эти классы кодов через 3-Gilb и 3-Gilb Perm, соответственно);
- вероятностный ансамбль блочно-циркулянтных кодов со случайными базовыми матрицами (4) (обозначим этот класс как ВСС);
- вероятностный ансамбль блочно-перестановочных кодов со случайно сгенерированными перестановками (обозначим этот класс как ВРС).

Проанализируем коды из указанных ансамблей для $\gamma = 3$, $\rho = 6$ и для $\gamma = 3$, $\rho = 12$. В случае $\gamma = 2$ результаты БЦК и БПК не будут лучше, чем у кодов Гилберта, при $\gamma = 4$, как отмечалось, ухудшается относительная корректирующая способность, т.к. для кодов одинаковой длины и скорости размер блока m , являющийся верхней границей для b_0 , заметно уменьшается с ростом γ .

Для указанных конструкций будем оценивать расхождение максимальной длины b_0 исправляемого пакета и верхней границы для БЦК и БПК, равной $m - 1$, а точнее, будем оценивать величину $m - b_0$, лучшую (минимальную) среди сгенерированных кодов вероятностного ансамбля. При расхождении $m - b_0 = 1$ будем получать оптимальные коды, достигающие максимально возможной корректирующей способности для БЦК и БПК.

На рисунке 2 показаны результаты моделирования для расширенных кодов Гилберта вида (6) и (7). Можно заметить, что для простых значений размера блока для обоих кодов расхождение равно единице, т.е. достигается максимальное значение корректирующей способности. Однако для составных m случайные коды Гилберта показывают лучший результат, чем детерминированные: для нечётных размеров блока в ансамбле всегда находится код с корректирующей способностью $b = m - 1$, а для нечётных – $b = m - 2$. Коды вида (6) для составных m показывают сравнительно небольшую длину исправляемого пакета.

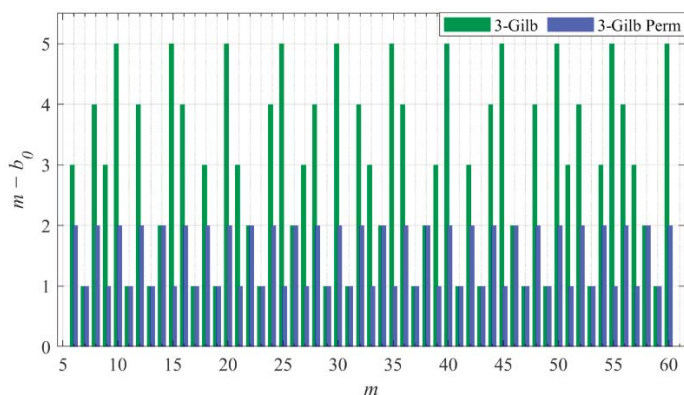


Рис. 2. Зависимость расхождения корректирующей способности размера блока для расширенных кодов Гилберта при $\rho = 6$

На рисунке 3 представлены результаты моделирования для БЦК, БПК и расширенных кодов Гилберта при $\rho = 6$.

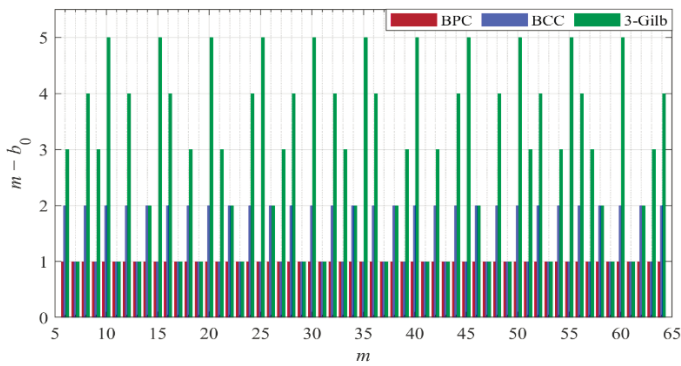


Рис. 3. Зависимость расхождения корректирующей способности размера блока для МППЧ-кодов при $\gamma = 3$, $\rho = 6$

Для вероятностных ансамблей было сгенерировано 1000 случайных кодов и выбраны лучшие из них по корректирующей способности (увеличение выборки не приводит к значимым изменениям результатов). Как видно из рисунка, для БПК были найдены коды с длиной исправляемого пакета $m - 1$ для всех рассмотренных значений m , для БЦК, как и для случайных кодов Гилберта, верхняя граница достигается для нечётных значений m и на единицу хуже для чётных значений. Расширенные детерминированные коды Гилберта оптимальны при простых m и приведены для сравнения.

Из рисунков 2 и 3 видно, что циклические вероятностные конструкции, т. е. коды вида (6) и БЦК, показывают одинаковую корректирующую способность для лучших случаев. На рисунке 4 представлена вероятность нахождения кода с максимальной корректирующей способностью для этих конструкций при нечётном размере блока. Как видно из графиков, для случайных расширенных кодов Гилберта вероятность нахождения кода с $b = b_0$ заметно выше, чем для БЦК.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования для БЦК, БПК и расширенных кодов Гилберта при $\rho = 12$. Для вероятностных ансамблей было сгенерировано 100 случайных кодов. Как видно из рисунка, результаты несколько хуже для БПК – при некоторых малых значениях размера блока m не были найдены оптимальные коды с максимальной длиной пакета. Заметно хуже результаты для БЦК, и расширенные коды Гилберта снова показывают наихудший результат. Возможно, при увеличении выборки могут быть найдены коды, более близкие к оптимальным. При этом при простых m , как и ранее, во всех случаях для всех конструкций получены коды максимальной корректирующей способности.

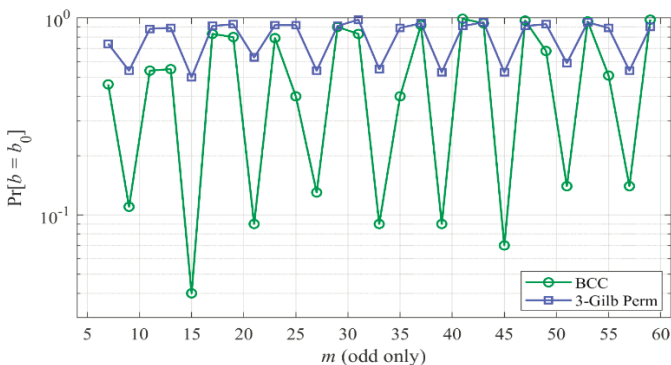


Рис. 4. Вероятность нахождения кода с максимальной корректирующей способностью для БЦК и случайных расширенных кодов Гилберта

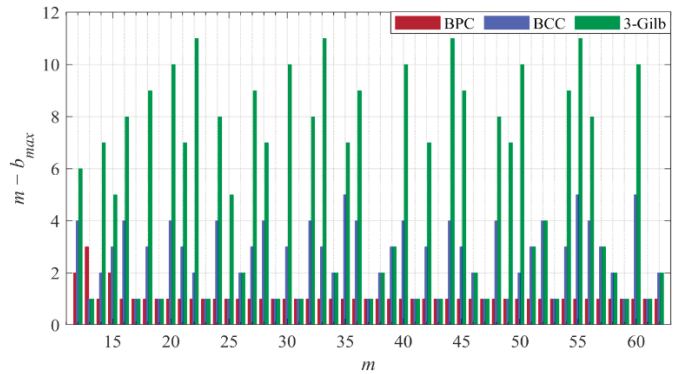


Рис. 5. Зависимость расхождения корректирующей способности размера блока для МППЧ-кодов при $\gamma = 3$, $\rho = 12$

Заключение

В статье рассматривается задача определения корректирующей способности при исправлении пакетов ошибок для некоторых классов кодов с малой плотностью проверок на чётность, проверочная матрица которых состоит из блоков. На основе комбинаторной метрики Е.М. Габидулина сформулирован подход к определению комбинированного (компаундного) вектора ошибки, состоящего в общем случае из многократных пакетов и независимых ошибок, а также понятие обобщённой корректирующей способности.

Для случая исправления однократных пакетов ошибок проведена экспериментальная оценка корректирующей способности блочно-циркулянтных кодов, а также их подклассов: кодов Гилберта. Рассмотрено обобщение кодов Гилберта на основе детерминированной конструкции и вероятностного ансамбля. Показано, что детерминированные расширенные коды Гилберта достигают оптимальной для блочных конструкций корректирующей способности лишь для простых размеров блоков, тогда как вероятностные расширенные коды Гилберта могут быть оптимальны для любого нечётного размера блока. Этим же свойством обладают и блочно-циркулянтные конструкции общего вида, однако вероятность нахождения оптимальных кодов на основе вероятностных расширенных кодов Гилберта выше, чем для общего ансамбля блочно-циркулянтных кодов. Рассмотрен также вероятностный ансамбль блочно-перестановочных кодов, для которого показано, что он содержит оптимальные коды для любого размера блока проверочной матрицы.

Полученные результаты могут быть использованы для построения схем кодирования для систем связи, ошибки в которых характеризуются одиночными пакетами, позволяют выполнять адаптацию кодовых конструкций с учётом как статистических особенностей каналов связи, так и требований к вычислительной эффективности процедур кодирования и декодирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Krouk E. ARQ // Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications / eds. E. Krouk, S. Semenov. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1002/9780470976777.
2. Foss S., Kim D., Turlikov A. Efficient Remote Monitoring Through Noisy Random Access with Retransmissions // IEEE Access, 2025, vol. 13, pp. 183171-183183. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3624788.
3. Lin S., Li J. Fundamentals of classical and modern error-correcting codes. Cambridge: Cambridge University Press, 2022, 840 p. doi: 10.1017/9781009067928.
4. Morelos-Zaragoza R.H. The art of error correcting coding. 2nd ed. Chichester; Hoboken, NJ: John Wiley, 2006, 263 p.
5. Niu K., Zhang P., Dai J., Si Z., Dong C. A golden decade of polar codes: From basic principle to 5G applications // China Communications, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 94-121. doi: 10.23919/JCC.2023.02.015.
6. Karakchieva L., Trifonov P. A Recursive Soft-Input Soft-Output Decoding Algorithm // IEEE Transactions on Communications, 2024, vol. 72, no. 3, pp. 1290-1302. doi: 10.1109/TCOMM.2023.3334812.
7. Fominykh A., Shabunov K. Automorphism Set Construction for Automorphism Ensemble Decoding with Reduced Delay // IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, vol. 6, pp. 8625-8635. doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3617311.
8. Simegn D., Artemasov D., Andreev K., Rybin P., Frolov A. Generalized LDPC Codes with low-Complexity Decoding and Fast Convergence // IEEE Wireless Communications Letters, 2025. doi: 10.1109/LWC.2025.3600912.
9. K Kavitha., N Archana., R Hinduja., A K Aishwarya. Performance Analysis of LDPC Codes and Polar Codes // 2025 3rd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA) 2025 3rd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA). Coimbatore, India: IEEE, 2025, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICAECA63854.2025.11012493.
10. Kandhway K. Modeling burst errors in a fading channel // 2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT) 2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). Indore, India: IEEE, 2022, pp. 409-414. doi: 10.1109/CSNT54456.2022.9787652.
11. Исаева М.Н. Разработка и анализ методики построения множества плотных информационных совокупностей для исправления пакетов ошибок // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2024, Т. 18, № 10, С. 20-26. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-20-26.
12. Kuvshinov A., Timokhin I., Ivanov F. On the Concatenation of Superposition and Polar Codes // 2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) 2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, Russian Federation: IEEE, 2024, pp. 52-57. doi: 10.1109/SIBIRCON63777.2024.10758448.
13. Овчинников А.А., Фоминых А.А. Анализ и оптимизация схем кодирования для каналов с рэлеевскими замираниями // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2023, Т. 15, № 3, С. 47-56. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-3-47-56.
14. Ovchinnikov A.A. Usage of polar codes for fixed and random length error bursts correction // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 53-60. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-53-60.
15. Aharoni Z., Huleihel B., Pfister H.D., Permuter H.H. Data-Driven Polar Codes for Unknown Channels with and Without Memory // 2023 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Taipei, Taiwan: IEEE, 2023, pp. 1890-1895. doi: 10.1109/ISIT54713.2023.10206663.
16. Li L., Lv J., Li Y., Dai X., Wang X. Burst Error Identification Method for LDPC Coded Systems // IEEE Communications Letters, 2024, pp. 1-5. doi: 10.1109/LCOMM.2024.3391826.
17. Yang M., Pan Z., Djordjevic I.B. FPGA-based burst-error performance analysis and optimization of regular and irregular SD-LDPC codes for 50G-PON and beyond // Optics Express, 2023, vol. 31, no. 6, pp. 10936-10946. doi: 10.1364/OE.477546.
18. Song L., Huang Q., Wang Z. Construction of Multiple-Burst-Correction Codes in Transform Domain and Its Relation to LDPC Codes // IEEE Transactions on Communications, 2020, vol. 68, no. 1, pp. 40-54. doi: 10.1109/TCOMM.2019.2948341.
19. Gabidulin E.M. A brief survey of metrics in coding theory // Mathematics of Distances and Applications / eds. Michel Deza, Michel Petitjean, Krassimir Markov. Sofia, Bulgaria: ITHEA, 2012, pp. 66-84.
20. Veresova A.M., Isaeva M.N., Ovchinnikov A.A. Estimation of Independent Errors and Bursts Correction Capability of Linear Codes // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2024, pp. 23-27. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468456.
21. Вересова А.М. Уменьшение сложности декодирования пакетов ошибок блочно-перестановочными кодами на основе методики определения местоположения пакета // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2024, Т. 18, № 10, С. 12-19. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-12-19.
22. Крук Е.А., Овчинников А.А. Точная корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении пакетов ошибок // Информационно-управляющие системы, 2016, № 1, С. 80-87. doi: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.80.
23. Kabatiansky G., Krouk E., Semenov S. Error Correcting Coding and Security for Data Networks: Analysis of the Superchannel Concept. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005, 278 p.

ESTIMATION OF BURST ERROR CORRECTING CAPABILITY FOR CODE CONSTRUCTIONS BASED ON MATRICES FROM BLOCKS

Alina M. Veresova, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, a.veresova@guap.ru

Andrei M. Turlikov, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, turlikov@guap.ru

Vladimir A. Bogatyrev, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia,
vladimir.bogatyrev@gmail.com

Abstract

The article discusses the problem of evaluating the noise immunity of some codes with a low density of parity checks, the parity-check matrix of which is composed of blocks of various nature. A generalized approach to determining the correcting ability of a code is considered for the case when errors are a combination of bursts and independent errors of a given multiplicity, based on combinatorial coverage of a set of erroneous word positions. The purpose of this work is to analyze the correcting ability of ensembles of block-permutation codes in comparison with widely used block-circular codes, as well as their well-known subclasses to correct single error bursts. It is known that for all these designs, the maximum possible length of a fixed single burst is strictly less than the block size, so if the block size and maximum length differ by one, such codes are optimal within these designs. An experimental estimation of the length of the corrected single burst for Gilbert codes, their deterministic and probabilistic extensions, an ensemble of block-circulant codes, as well as an ensemble of block-permutation codes is carried out. It is shown that the ensemble of block-permutation codes contains optimal codes for block structures at any block size. This property is not possessed by the other constructions considered: for block-circulant codes, including extensions of the Gilbert code, optimal codes are found only for odd values of the block size. At the same time, the probability of selecting the code with the maximum correction ability from the ensemble is higher for the extended Gilbert code than for the general block-circulant code. The considered deterministic extended Gilbert code shows a relatively small correction ability and is optimal only for simple block size values. The results of the work can be used to build code schemes and increase the reliability of transmission in channels with a complex noise structure described by grouping errors.

Keywords: low-density parity-check codes, block-permutation construction, quasi-cyclic codes, error bursts, channels with memory

References

- [1] E. Krouk, 'ARQ', in *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*, E. Krouk and S. Semenov, Eds., Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1002/9780470976777.
- [2] S. Foss, D. Kim, and A. Turlikov, "Efficient Remote Monitoring Through Noisy Random Access With Retransmissions," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 183171-183183, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3624788.
- [3] S. Lin and J. Li, *Fundamentals of classical and modern error-correcting codes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009067928.
- [4] R. H. Morelos-Zaragoza, *The art of error correcting coding*, 2nd ed. Chichester; Hoboken, NJ: John Wiley, 2006.
- [5] K. Niu, P. Zhang, J. Dai, Z. Si, and C. Dong, "A golden decade of polar codes: From basic principle to 5G applications," *China Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 94-121, Feb. 2023, doi: 10.23919/JCC.2023.02.015.
- [6] L. Karakchieva and P. Trifonov, "A Recursive Soft-Input Soft-Output Decoding Algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 3, pp. 1290-1302, Mar. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2023.3334812.
- [7] A. Fominykh and K. Shabunov, "Automorphism Set Construction for Automorphism Ensemble Decoding With Reduced Delay," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 8625-8635, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3617311.
- [8] D. Simegn, D. Artemasov, K. Andreev, P. Rybin, and A. Frolov, "Generalized LDPC Codes With low-Complexity Decoding and Fast Convergence," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 1-1, 2025, doi: 10.1109/LWVC.2025.3600912.
- [9] K. Kavitha, N. Archana, R. Hinduja, and A. K. Aishwarya, "Performance Analysis of LDPC Codes and Polar Codes," in *2025 3rd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India: IEEE, Apr. 2025, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICAECA63854.2025.11012493.
- [10] K. Kandhway, "Modeling burst errors in a fading channel," in *2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, Indore, India: IEEE, Apr. 2022, pp. 409-414. doi: 10.1109/CSNT54456.2022.9787652.
- [11] M. N. Isaeva, "Development and analysis of a method for constructing dense information sets for error bursts correction," *T-Comm*, vol. 18, no. 10, pp. 20-26, 2024, doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-20-26. (in Russian)

- [12] A. Kuvshinov, I. Timokhin, and F. Ivanov, "On the Concatenation of Superposition and Polar Codes," in *2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Novosibirsk, Russian Federation: IEEE, Sep. 2024, pp. 52-57. doi: 10.1109/SIBIRCON63777.2024.10758448.
- [13] A. A. Ovchinnikov and A. A. Fominykh, "Analysis and optimization of error-correcting coding schemes for channels with Rayleigh fading," *H&ES Research*, vol. 15, no. 3, pp. 47-56, 2023, doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-3-47-56. (in Russian)
- [14] A. A. Ovchinnikov, "Usage of polar codes for fixed and random length error bursts correction," *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 25, no. 1, pp. 53-60, 2025, doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-53-60.
- [15] Z. Aharoni, B. Huleihel, H. D. Pfister, and H. H. Permuter, "Data-Driven Polar Codes for Unknown Channels With and Without Memory," in *2023 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Taipei, Taiwan: IEEE, Jun. 2023, pp. 1890-1895. doi: 10.1109/ISIT54713.2023.10206663.
- [16] L. Li, J. Lv, Y. Li, X. Dai, and X. Wang, "Burst Error Identification Method for LDPC Coded Systems," *IEEE Commun. Lett.*, pp. 1-5, 2024, doi: 10.1109/LCOMM.2024.3391826.
- [17] M. Yang, Z. Pan, and I. B. Djordjevic, "FPGA-based burst-error performance analysis and optimization of regular and irregular SD-LDPC codes for 50G-PON and beyond," *Opt. Express*, vol. 31, no. 6, pp. 10936-10946, Mar. 2023, doi: 10.1364/OE.477546.
- [18] L. Song, Q. Huang, and Z. Wang, "Construction of Multiple-Burst-Correction Codes in Transform Domain and Its Relation to LDPC Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 1, pp. 40-54, Jan. 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2948341.
- [19] E. M. Gabidulin, "A brief survey of metrics in coding theory," in *Mathematics of Distances and Applications*, Michel Deza, Michel Petitjean, and Krassimir Markov, Eds., Sofia, Bulgaria: ITHEA, 2012, pp. 66-84.
- [20] A. M. Veresova, M. N. Isaeva, and A. A. Ovchinnikov, "Estimation of Independent Errors and Bursts Correction Capability of Linear Codes," in *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, Jan. 2024, pp. 23-27. doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468456.
- [21] A. M. Veresova, "Reducing the complexity of error bursts decoding using block-permutation codes based on the method of determining the location of the burst," *T-Comm*, vol. 18, no. 10, pp. 12-19, 2024, doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-12-19. (in Russian)
- [22] E. A. Krouk and A. A. Ovchinnikov, "Exact Burst-Correction Capability of Gilbert Codes," *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)*, no. 1, pp. 80-87, Jan. 2016, doi: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.80. (in Russian)
- [23] G. Kabatiansky, E. Krouk, and S. Semenov, "Error Correcting Coding and Security for Data Networks: Analysis of the Superchannel Concept," Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

Information about authors:

Alina M. Veresova, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Senior Lecturer, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0002-3792-9249

Andrei M. Turlikov, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Head of the Department; Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0001-7132-094X

Vladimir A. Bogatyrev, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Security, Dr. Sc., Tech., Professor St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0003-0213-0223

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ВОЗВРАТА ОТ 2-ШАГОВОЙ К 4-ШАГОВОЙ ПРОЦЕДУРЕ СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-33-40

Manuscript received 21 August 2025;

Accepted 24 October 2025

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305/ <https://rscf.ru/project/22-19-00305/> "Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом пользователей".

Рачугин Роман Олегович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, rro1699@gmail.com

Ключевые слова: 2-шаговая процедура случайного доступа, пропускная способность, 4-шаговая процедура случайного доступа, mMTC, Интернет Вещей

В настоящее время осуществляется активное развертывание и развитие сотовых сетей стандарта связи пятого поколения (5G), параллельно ведутся научные дискуссии относительно архитектурных особенностей и ключевых технологий следующего поколения беспроводных сетей. В рамках данных стандартов значительное внимание уделяется сценариям применения Интернета Вещей (Internet of Things, IoT). В системах массового IoT основным сценарием передачи данных является сценарий массовой межмашинной связи (mMTC). Одним из основных требованиями к сценарию mMTC является возможность обработки потенциально неограниченного количества устройств. Тенденция развития данного сценария предполагает повышение количества устройств в рамках работы одной точки доступа. Большое количество устройств обуславливает необходимость использования методов случайного множественного доступа для передачи по общему каналу. В таком случае, возрастают требования к показателям эффективности будущих поколений систем беспроводной связи, таким как: пропускная способность, плотность подключения устройств, задержка передачи данных. В современных сетях используется 4-шаговая процедура случайного доступа. Однако, использование 4-шаговой процедуры в рамках сценария массовой межмашинной связи имеет ряд недостатков: большой объем передаваемых служебных сообщений по отношению к передаваемой информации от устройств Интернета Вещей, увеличение времени передачи из-за более позднего обнаружения коллизий. В новых стандартах беспроводных сетей (5G NR) добавлена возможность использования 2-шаговой процедуры случайного доступа, которая уменьшает количество служебных сообщений. Однако, в некоторых случаях данная процедура случайного доступа также имеет недостатки: увеличение вероятности коллизии данных. Поэтому в ряде работ описывается возможность перехода от 2-шаговой процедуры в 4-шаговую процедуру при условии получения fallback RAR. Точной формулировки такого перехода нет. В данной работе предлагается несколько вариантов такого перехода и проводится сравнительный анализ этих переходов. По результатам анализа делается вывод, что некоторые варианты перехода являются наиболее перспективными для возможного использования в процедурах случайного доступа будущих поколений беспроводных сетей.

Информация об авторе:

Рачугин Роман Олегович, аспирант кафедры №25 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Рачугин Р.О. Анализ вариантов возврата от 2-шаговой к 4-шаговой процедуре случайного доступа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 33-40.

For citation:

R.O. Rachugin, "Analysis types of backoff from 2-step to 4-step random access procedure," T-Comm, 2025, vol. 19, no.11, pp. 33-40. (in Russian)

Введение

Алгоритмы случайного доступа играют ключевую роль в управлении соединениями устройств в беспроводных сетях, особенно в условиях растущего числа устройств. Эти алгоритмы обеспечивают первоначальный доступ пользовательского оборудования (UE) к сети, что является критически важным этапом установления связи. Наиболее распространенной процедурой случайного доступа является 4-шаговая процедура случайного доступа. Данную процедуру можно описать при помощи следующего алгоритма [1]:

Шаг 1. Каждый пользователь независимо принимает решение о передаче сообщения msg1 в начале кадра 4-шаговой процедуры случайного доступа.

Шаг 2. Базовая станция отвечает сообщением msg2.

Шаг 3. Пользователь отправляет на базовую станцию msg3.

Шаг 4. Базовая станция отвечает сообщением msg4.

Msg1 представляет собой преамбулу (последовательность определенной длины) из набора преамбул, используемых в процедуре случайного доступа. Согласно [2] msg2 является RAR (random access response), которая включает в себя: 1) временную метку, которая используется пользователем для корректировки времени передачи в восходящем канале; 2) грант в восходящем канале (ресурс для передачи msg3); 3) временной идентификатор для успешно принятых преамбул. Msg3 – запрос на подключение (connection request), отправляющийся в выделенном ресурсе в восходящем канале. Данное сообщение состоит из пользовательского идентификатора. Msg4 представляет собой сообщение (Contention Resolution). Данное сообщение подтверждает идентификацию пользователя и заканчивает процедуру случайного доступа.

В рамках внедрения и использования сетей нового поколения (5G) 4-шаговая процедура случайного доступа сталкивается с рядом недостатков, требуемых сценариями использования в сетях 5G, такими как:

1) традиционная 4-шаговая процедура RA не удовлетворяет требованиям к задержке для приложений сверхнадёжной связи с малой задержкой (URLLC) [3].

2) в сценариях массовой межмашинной связи (mMTC) большое количество пользователей может пытаться получить доступ к сети одновременно, что приводит к коллизиям случайного доступа и проблемам повторной передачи [4].

3) большой объем сервисных сообщений по отношению к передаваемым данным от пользовательских устройств [3].

Для решения данных недостатков 4-шаговой процедуры случайного доступа в сетях LTE и 5G предлагаются следующие алгоритмы и методы:

1) Адаптивное распределение множества преамбул для максимизации пропускной способности с учетом нагрузки: Этот алгоритм предназначен для приоритизации при случайном доступе в 5G, особенно для межмашинного взаимодействия с высокой нагрузкой и неоднородными требованиями к качеству обслуживания (QoS) [5]. Основная идея данного алгоритма заключается в динамическом выделении различного числа преамбул разным классам устройств, основываясь на текущую нагрузку и требования к качеству обслуживания. Адаптивное распределение преамбул работает следующим образом: преамбулы делятся на две группы «высокоприоритетные» и «низкоприоритетные», соотношение преамбул между группами динамически изменяется. Максимизация

пропускной способности достигается за счет оптимизации количества преамбул в каждой группе, тем самым повышая общую пропускную способность.

2) Разрешение конфликтов с использованием идентификаторов абонентов: Этот метод решает проблему случайного доступа, улучшая масштабируемость протокола установления соединения в сетях LTE [6]. Основной идеей данного метода является динамическая приоритизация передачи устройствами на основе уникальных идентификаторов. Данный метод работает следующим образом: устройства передают свои идентификаторы в виде бинарных последовательностей, затем базовая станция выявляет конфликты и определяет устройства с наивысшим приоритетом для доступа. Использование данного подхода позволяет уменьшить коллизии во время процедуры случайного доступа, а также повысить пропускную способность.

3) Запрет класса доступа (ACB) [7-9]. Идея данного механизма заключается в том, что абоненты принимают решение о передаче преамбулы на первом этапе процедуры случайного доступа с определенной вероятностью. Таким образом, не все абоненты будут передавать преамбулу на шаге 1 в каждой итерации процедуры, что позволяет уменьшить количество коллизий и среднюю задержку передачи в системах случайного доступа. Для уменьшения средней задержки вероятность передачи в ACB в целом должна зависеть от количества абонентов, участвующих в процедуре случайного доступа [10]. На основе точного знания количества абонентов, готовых к передаче, можно выбрать оптимальную вероятность передачи, которая минимизирует среднюю задержку передачи. Эта стратегия использует знание точного количества абонентов, что на практике невозможно.

4) Глубокое обучение для обнаружения преамбул: методы глубокого обучения могут использоваться для улучшения обнаружения агрегированных последовательностей преамбул [11]. Основная идея данного метода заключается в агрегации последовательностей Задова-Чу из разных корней для создания большего набора доступных преамбул. Это позволяет значительно увеличить количество уникальных преамбул за счет всех возможных комбинаций пар последовательностей.

Описанные алгоритмы и методы, позволяют решить ряд недостатков 4-шаговой процедуры случайного доступа для применения в сетях 5G, но не решают недостаток большого объема сервисных сообщений, поэтому в сетях 5G NR предложен переход к 2-шаговой процедуре случайного доступа [12, 13]. Данную процедуру можно описать при помощи следующего алгоритма:

Шаг 1. Пользователь выбирает одну из преамбул и передаёт её вместе со своими данными (msgA).

Шаг 2. Базовая станция детектирует преамбулу и пытается детектировать пользовательские данные, затем возвращает ответ пользователю (msgB).

Сообщение msgA является объединением сообщений msg1 и msg3 из 4-шаговой процедуры случайного доступа, а сообщение msgB является объединением сообщений msg2 и msg4.

Множество исследований посвящено сравнению двух основных схем случайного доступа. Так, в работе [14] проводится анализ 2-шаговой и 4-шаговой процедур с точки зрения вероятности успешной передачи пакетов, среднего энергопотребления и пропускной способности. Результаты показывают, что 2-шаговая процедура демонстрирует более

высокую вероятность успешной передачи, меньшее энергопотребление и повышенную пропускную способность по сравнению с 4-шаговой.

В другой работе [15] рассматриваются те же две процедуры, но в условиях модели «запрос-очередь» с передачей данных блоками по M пакетов. Предполагается, что каждый абонент имеет буфер неограниченного размера с изначально заполненной очередью сообщений. В данной конфигурации авторы приходят к выводу, что 4-шаговая процедура превосходит 2-шаговую по максимальной пропускной способности и обеспечивает меньшую среднюю задержку.

Согласно исследованиям [12-14], в 2-шаговой процедуре случайного доступа возможно два различных способа сопоставления преамбул и ресурсных блоков для передачи пользовательских данных: взаимно-однозначное (one-to-one) и многоканальное (many-to-one) отображение. Следует отметить, что при использовании подхода many-to-one повышается вероятность ошибок декодирования пользовательских данных. В то же время, подход one-to-one хотя и снижает вероятность ошибочного декодирования, но требует больше ресурсов для передачи данных. Как отмечено в [12], в случае успешного детектирования преамбулы при неуспешном декодировании пользовательских данных базовая станция отправляет fallback RAR-сообщение, что приводит к переходу пользователя к 4-шаговой процедуре (начиная с этапа передачи пользовательских данных msg3).

В данном исследовании рассматривается исключительно случай many-to-one сопоставления. Ошибки приема пользовательских данных могут быть вызваны как шумами канала, так и коллизиями при выборе преамбул.

1 Обзор 2-шаговой процедуры случайного доступа

В целях последующего анализа рассмотрим более детально 2-шаговую процедуру случайного доступа, предполагающую отображение по схеме many-to-one между преамбулами и ресурсными блоками, предназначенными для передачи пользовательских данных. Как было сказано ранее, при получении fallback RAR сообщения осуществляется переход от 2-шаговой процедуры случайного доступа к 4-шаговой.

На текущий момент отсутствует установленное определение условий перехода от 2-шаговой к 4-шаговой процедуре случайного доступа. В связи с этим в настоящей работе будут рассмотрены несколько интерпретаций. Переход к 4-шаговой процедуре будет инициирован только в случае получения пользователем отклика типа fallback RAR. Согласно работе [12] переход к 4-шаговой процедуре начинается с передачи сообщения msg3. Предположим, что в таком случае пользователь передает msg3 (состоящее из RRC и своих данных), затем базовая станция декодирует сообщение и отвечает сообщением msg4. Такая интерпретация наиболее похожа на базовый алгоритм 4-шаговой процедуры. Схема рассмотренной интерпретации представлена на рисунке 1.

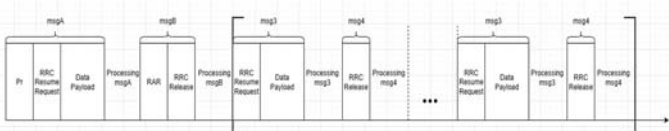


Рис. 1. Первая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

В рассмотренной ранее интерпретации на каждое сообщение msg3, базовая станция отвечает сообщением msg4. Аналогично работе [15], где данные передавались блоками по M пакетов, можно предположить возможность одинарного ответа от базовой станции на последовательность сообщений от разных пользователей в соответствии с порядком их передачи. Рассмотрим вторую интерпретацию перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. В данном случае пользователи также начинают передачу с msg3 (состоящее из RRC и своих данных), но в данном случае базовая станция ответит лишь одним сообщением msg4 после приема всех msg3. Будем полагать, что длительность передачи сообщения msg4 остается неизменной. Схема данной интерпретации представлена на рисунке 2.

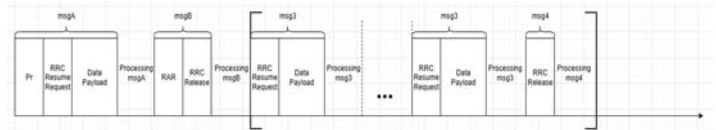


Рис. 2. Вторая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

Вторая схема уменьшает общее время, затрачиваемое на часть кадра процедуры случайного доступа, а также потенциально уменьшает нагрузку на базовой станции, так как в данном случае базовой станции необходимо отправить в ответ только 1 сообщение msg4.

Другой интерпретацией возможного перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой является схема, в которой пользователи передают одно общее RRC сообщение. Будем полагать, что длительность данного блока не изменяется. Далее каждый пользователь передает только свои данные. Затем базовая станция декодирует пользовательские данные и на каждое сообщение с пользовательскими данными отвечает сообщением msg4. В данном случае общее время части кадра случайного доступа для 4-шаговой процедуры уменьшается по сравнению с первой интерпретацией. Схема данной интерпретации представлены на рисунке 3.

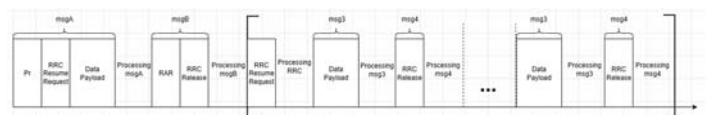


Рис. 3. Третья схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

Четвертой интерпретацией, рассматриваемой в этой работе, является схема, которая является комбинацией второй и третьей интерпретации. В данном случае часть кадра 4-шаговой процедуры начинается с передачи общего RRC сообщения всех пользователей, затем каждый пользователь передает свои данные. После получения всех пользовательских данных базовая станция отвечает одним общим сообщением msg4 для всех переданных пользовательских данных в соответствии с порядком их передачи. Аналогично предыдущим интерпретациям будем полагать, что длительность RRC сообщения и msg4 не изменяется. Время части кадра случайного доступа уменьшается по сравнению со всеми рассмотренными ранее интерпретациями. Однако, в данном случае для реализации такой интерпретации необходимы дополнительные вычислительные ресурсы на базовой станции.

Схема такой интерпретации представлены на рисунке 4.

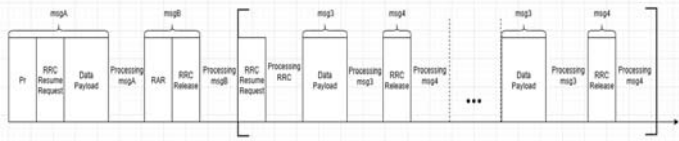


Рис. 4. Четвертая схема интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре

В дальнейшем под 2-шаговой процедурой случайного доступа с переходом к 4-шаговой будет пониматься такой сценарий, при котором изначально применяется 2-шаговый доступ, однако в зависимости от условий (например, при получении fallback RAR) осуществляется переключение на 4-шаговую процедуру.

Следовательно, описанный ранее алгоритм работы 2-шаговой процедуры можно представить с следующим виде:

Шаг 1: Пользователи независимо выбирают одну из преамбул и передают её вместе со своими данными в msgA в начале кадра 2-шаговой процедуры случайного доступа. Вероятность передачи определяется вероятностью $p = \min\left(1, \frac{L}{M_t}\right)$ (где M_t – это число активных пользователей в кадре t , а L – число уникальных преамбул в системе).

Шаг 2: Базовая станция детектирует и оценивает число полученных преамбул, а также пытается декодировать пользовательские данные. Далее посылает пользователям msgB.

Шаг 3: Затем система работает в соответствии с полученным ответом от базовой станции.

- В случае получения успешного RAR система переходит к следующему кадру 2-шаговой процедуры случайного доступа.
- В случае получения fallback RAR система переходит к 4-шаговой процедуре, используя один из ранее описанных способов перехода. Важно заметить, что в системе для 4-шаговой процедуры выделяется i дополнительных ресурсных блоков, где i – число уникальных преамбул, полученных базовой станцией после обработки msgA.

2 Анализ пропускной способности для интерпретаций перехода из 2-шаговой в 4-шаговую процедуру случайного доступа

Введем упрощенную модель системы для 2-шаговой процедуры случайного доступа со следующими допущениями:

Допущение 1. Система имеет L уникальных преамбул. Преамбула – некоторый сигнал. Базовая станция достоверно определяет номера уникальных преамбул. Однако, базовая станция не может оценить точное число пользователей, выбравших одинаковую преамбулу.

Допущение 2. Всё время работы системы разбито на кадры. Все абоненты точно знают границы кадров и могут участвовать в процедуре случайного доступа только в начале каждого кадра.

Допущение 3. Система имеет потенциально неограниченное число пользователей. В таком случае понятия «пользователь» и «сообщение» эквивалентны. Количество сообщений, поступающих в систему в каждом кадре распределено по закону Пуассона с параметром λ .

Для введенной модели системы и ранее описанных интерпретаций перехода из 2-шаговой процедуры случайного доступа в 4-шаговую определим и проанализируем пропускную способность. Обозначим пропускную способность как η_s , которая подразумевает максимальную входную интенсивность пользователей в систему в течении 1 секунды (Λ) и конечной задержкой.

Для определения η_s необходимо сделать перерасчет пропускной способности из [пользователей\слот] в [пользователей\длительность кадра СД]. Пропускная способность может быть посчитана как отношение числа успешно переданных сообщений на среднюю длительность кадра процедуры случайного доступа. В таком случае, с учетом временных расходов на сервисные сообщения, пропускная способность может быть посчитана как $\eta(L) = Le^{-1}$. Таким образом, η_s может быть посчитана по следующей формуле:

$$\eta_s = 1000Le^{-1} / E[T_{CD}] \quad (1)$$

где $E[T_{CD}]$ – среднее время кадра случайного доступа.

Для дальнейшего анализа посчитаем $E[T_{CD}]$ для каждой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой. Данную величину для первой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой можно посчитать как:

$$E[T_{CD1}] = \sum_{j=0}^{\infty} T_{CD1}(L|j) \Pr\{j\}, \quad (2)$$

где $\Pr\{j\}$ – это вероятность того, что j пользователей решил передать, $T_{CD1}(L|j)$ – длительность кадра процедуры случайного доступа для первой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры в 4-шаговую.

Значение $T_{CD1}(L|j)$ может быть посчитано по следующей формуле:

$$T_{CD1}(L|j) = \begin{cases} T_{2\text{-шаговая}}, & j \in \{0,1\}; \\ T_{2\text{-шаговая}} + T_1 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\}, & j \geq 2, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{2\text{-шаговая}}$ – время 2-шаговой процедуры, T_1 – время затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в первой интерпретации, $I\{q_i | j\}$ – индикаторная функция, означающая что i -тую преамбулу выбрал хотя бы один абонент при j активных пользователях, участвующих в процедуре случайного доступа.

Рассмотрим детальнее слагаемые в (3). Время, затрачиваемое на часть 2-шаговой процедуры может быть определена как сумма интервалов времени, затрачиваемых для передачи и обработки сообщений msgA и msgB. В таком случае формула для расчета $T_{2\text{-шаговая}}$ будет иметь следующий вид:

$$T_{2\text{-шаговая}} = T_{msgA} + T_{PmsgA} + T_{msgB} + T_{PmsgB} \quad (4)$$

где T_{msgA} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msgA, T_{PmsgA} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msgA, T_{msgB} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msgB, T_{PmsgB} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msgB.

Для расчета T_1 может быть использована следующая формула:

$$T_1 = T_{msg3} + T_{Pmsg3} + T_{msg4} + T_{Pmsg4}, \quad (5)$$

где T_{msg3} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msg3, T_{Pmsg3} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msg3, T_{msg4} – время, затрачиваемое на передачу сообщения msg4, T_{Pmsg4} – время, затрачиваемое на обработку сообщения msg4.

Из описания алгоритма работы 2-шаговой процедуры описанного ранее следует, что число пользователей, решивших передать в кадре это некоторая случайная величина. При увеличении числа пользователей распределение данной случайной величины сходится к распределению Пуассона с параметром L . Следовательно, (2) может быть записана в следующем виде:

$$E[T_{CD1}] = T_{2-шаговая} (1+L)e^{-L} + \sum_{j=2}^{\infty} \left(T_{2-шаговая} + T_1 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} \right) \frac{L^j}{j!} e^{-L}. \quad (6)$$

В работе [16] среднее значение функции $I\{q_i | j\}$ может быть посчитано по следующей формуле:

$$E[I\{q_i | j\}] = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{L} \right)^j \right). \quad (7)$$

Согласно анализу похожей системы с расписанием, представленному в работе [16], конечное выражение для (6) будет иметь следующий вид:

$$E[T_{CD1}] = T_{2-шаговая} + T_1 L (1 - e^{-1} - e^{-L}). \quad (8)$$

Посчитаем среднее время кадра процедуры случайного доступа для второй интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. В данном случае формула расчета времени необходимого на кадр процедуры случайного доступа будет иметь вид:

$$T_{CD2}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_2 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{P4}, j \geq 2, \end{cases} \quad (9)$$

где T_2 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры во второй интерпретации перехода, T_{P4} – время необходимое для передачи и обработки одного сообщения msg4.

Значение T_2 может быть посчитано, используя формулу:

$$T_2 = T_{msg3} + T_{Pmsg3}. \quad (10)$$

Формула для расчета T_{P4} будет иметь следующий вид:

$$T_{P4} = T_{msg4} + T_{Pmsg4}. \quad (11)$$

Аналогично выводу, представленному для первой интерпретации, покажем итоговую формулу расчета среднего времени необходимого для одного кадра случайного доступа второй интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Данное значение может быть посчитано по следующей формуле:

$$E[T_{CD2}] = T_{2-шаговая} + T_2 L (1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{P4} (1 - e^{-L} - L e^{-L}). \quad (12)$$

Рассмотрим третью интерпретацию перехода. Для расчета времени кадра процедуры случайного доступа имеет следующий вид:

$$T_{CD3}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_3 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{CRRC}, j \geq 2, \end{cases} \quad (13)$$

где T_3 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в третьей интерпретации, T_{PRRC} – время необходимое на передачу и обработку одного сообщения RRC.

Значение T_3 может быть посчитано по формуле:

$$T_3 = T_{data} + T_{Pdata} + T_{msg4} + T_{Pmsg4}. \quad (14)$$

где T_{data} – время, затрачиваемое на передачу пользовательских данных, T_{Pdata} – время, затрачиваемое на обработку пользовательских данных.

Формула для расчета значений T_{CRRC} имеет следующий вид:

$$T_{CRRC} = T_{RRC} + T_{PRRC}. \quad (15)$$

где T_{RRC} – время, затрачиваемое на передачу сообщения RRC, T_{PRRC} – время, затрачиваемое на обработку сообщения RRC.

Для расчета средней длительности кадра случайного доступа данной интерпретации воспользуемся аналогичным подходом расчета как для первой интерпретации. В таком случае, средняя длительность кадра процедуры случайного доступа может быть посчитана по следующей формуле:

$$E[T_{CD3}] = T_{2-шаговая} + T_3 L (1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{CRRC} (1 - e^{-L} - L e^{-L}). \quad (16)$$

Далее покажем, как может быть посчитано время кадра случайного доступа для четвертой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Данное значение может быть посчитано следующим образом:

$$T_{CD4}(L | j) = \begin{cases} T_{2-шаговая}, j \in \{0, 1\}; \\ T_{2-шаговая} + T_4 \sum_{i=1}^L I\{q_i | j\} + T_{CRRC} + T_{P4}, j \geq 2, \end{cases} \quad (17)$$

где T_4 – время, затрачиваемое на один блок 4-шаговой процедуры в четвертой интерпретации перехода.

Значения T_4 могут быть посчитаны по следующей формуле:

$$T_4 = T_{data} + T_{Pdata}. \quad (18)$$

Основываясь на выводе средней задержки кадра процедуры случайного доступа для первой интерпретации и (18), средняя задержка для данной интерпретации может быть посчитана как:

$$E[T_{CD4}] = T_{2\text{-шаговая}} + T_4L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + (T_{CRRC} + T_{P4})(1 - e^{-L} - Le^{-L}). \quad (19)$$

Следовательно, с учетом (1), (6), (12), (16) и (19) можем определить формулы для расчета значения η_s для каждой интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре. Формулы для расчета пропускной способности имеют следующий вид:

$$\eta_{s1}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_1L(1 - e^{-1} - e^{-L})}. \quad (20)$$

$$\eta_{s2}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_2L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{P4}(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (21)$$

$$\eta_{s3}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_3L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + T_{CRRC}(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (22)$$

$$\eta_{s4}(L) = \frac{1000Le^{-1}}{T_{2\text{-шаговая}} + T_4L(1 - e^{-1} - e^{-L}) + (T_{CRRC} + T_{P4})(1 - e^{-L} - Le^{-L})}. \quad (23)$$

Для вычисления значений η_s воспользуемся типовыми значениями интервалов времени передачи сообщений в 4-шаговой и 2-шаговой процедурах случайного доступа, приведенных в таблице 2 в работе [15]. Необходимые нам интервалы времени имеют следующие значения: $T_{msgA} = 2TTI + T_{data}$ (TTI – интервал времени передачи, T_{data} – время необходимое на передачу пользовательских данных), $T_{PmsgA} = 1TTI + 3$ мс, $T_{msgB} = 2TTI$, $T_{msg3} = TTI + T_{data}$, $T_{Pmsg3} = 3$ мс, $T_{Pdata} = 3$ мс – TTI и $T_{PmsgB} = T_{msg4} = T_{Pmsg4} = T_{RRC} = T_{PRRC} = TTI$. Предположим, что $TTI = 0,5$ мс.

4 Результаты расчета пропускной способности для интерпретаций перехода от 2-шаговой к 4-шаговой с учетом временных затрат

Расчетные значения полученные по (20) – (23) представлены на рисунках 5 и 6.

На рисунке 5 представлена зависимость пропускной способности с учетом временных интервалов η_s от числа уникальных преамбул L при $T_{data} = TTI$ для всех интерпретаций перехода.

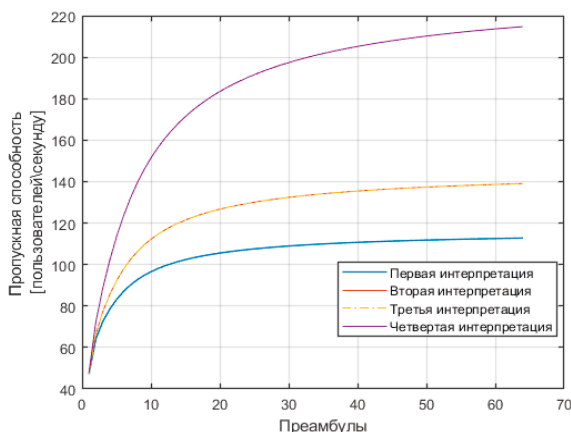


Рис. 5. График зависимости пропускной способности от числа уникальных преамбул при $T_{data} = 0,5$ мс

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что при $T_{data} = TTI$ наилучшую пропускную способность при числе преамбул $L > 1$ имеет четвертая интерпретация, наихудшую – первая интерпретация. Вторая и третья интерпретация равны друг другу, так как длительность передачи и обработки RRC равна длительности и обработке сообщения msg4.

На рисунке 6 представлены результаты расчета зависимости пропускной способности η_s от числа преамбул L при $T_{data} = 10$ мс.

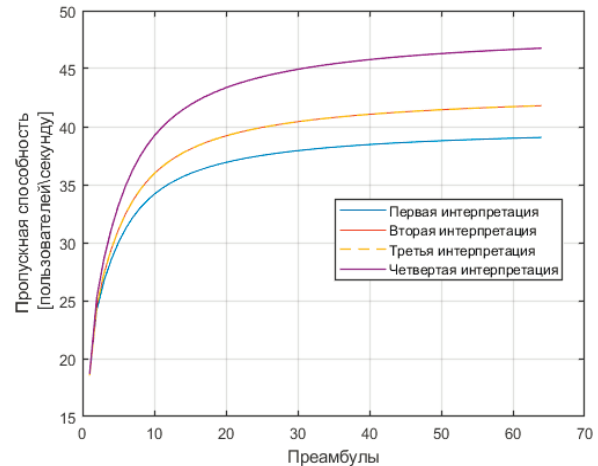


Рис. 6. График зависимости пропускной способности от числа уникальных преамбул при $T_{data} = 10$ мс

Согласно представленным результатам на рисунке 6 при увеличении T_{data} выигрыш четвертой интерпретации от остальных уменьшается, по сравнению с результатами представленными на рисунке 5. Однако, при такой длительности T_{data} четвертая интерпретация всё ещё имеет наилучшую пропускную способность по сравнению с остальными интерпретациями, а первая наихудшую. Важно отметить, что данный выигрыш достигается за счет увеличения необходимых вычислительных ресурсов на базовой станции.

Выводы

В данной работе был проведен обзор 4-шаговой процедуры случайного доступа. В ходе обзора обозначены некоторые недостатки, которые ограничивают применение 4-шаговой процедуры в сетях 5G. Также, были описаны алгоритмы и методы, позволяющие адаптировать применение стандартной 4-шаговой процедуры случайного доступа для сетей 5G. Кроме этого, была описана 2-шаговая процедура случайного доступа и интерпретации перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой процедуре случайного доступа в случае получения fallback RAR. Для всех рассмотренных интерпретаций проведен анализ и расчет пропускной способности. Произведено сравнение расчета пропускной способности для четырех интерпретаций перехода при разных значениях длительности интервала передачи пользовательских данных.

Согласно полученным результатам расчета пропускной способности можно заключить, что при рассмотренных значениях длительности интервала передачи пользовательских данных четвертый вариант интерпретации имеет наибольшую пропускную способность при любом значении числа уникальных преамбул $L > 1$.

Однако, при увеличении длительности интервала передачи пользовательских данных выигрыш четвертой интерпретации уменьшается. Также, важно отметить, что все интерпретации кроме первой требуют увеличенных вычислительных ресурсов на базовой станции.

Проведенные результаты исследования показывают, что разные варианты перехода от 2-шаговой процедуры к 4-шаговой позволяют добиться разной пропускной способности. Первая интерпретация перехода аналогична 4-шаговой процедуре случайного доступа. Отметим, что для этого вида перехода не требуется дополнительных изменений в работе базовой станции, однако, данная интерпретация имеет наихудшие значения пропускной способности.

Вторая и третья интерпретации перехода показывают одинаковые результаты при учете того, что длительность передачи и обработки сообщения msg4 равна длительности передачи и обработки сообщения RRC. Для обоих вариантов перехода увеличение пропускной способности относительно первого варианта обуславливается необходимостью усложнения части передачи сообщения msg4 для второй интерпретации перехода и передачи сообщения RRC для третьей интерпретации.

Четвертая интерпретация имеет наилучшую пропускную способность, но данный выигрыш обуславливается необходимостью усложнением части передачи сообщений msg4 и RRC, так как применяется комбинированная идея из второго и третьего варианта перехода от 2-шаговой процедуры случайного доступа к 4-шаговой.

Финансовая поддержка

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305-П <https://rscf.ru/project/22-19-00305/> "Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом пользователей".

Литература

1. *Toor W. T.* Evolution of random access process: From Legacy networks to 5G and beyond // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2022. Vol. 33. No. 6. P. E3776.

2. *Yang, Bei.* Intelligent random access for massive-machine type communications in sliced mobile networks // Electronics, 2023. No. 2. P. 329.

3. *Segura, David.* 5G early data transmission (Rel-16): Security review and open issues // IEEE Access, 2022. No. 10. P. 93289-93308.

4. *Wang W. C.* Low Latency Signature-Based 4-Step Random Access Procedure for Massive Machine-Type Communications // Journal of Mobile Multimedia, 2024. Vol. 20. No. 1, pp. 213-238.

5. *Althumali, H., Othman, M.* Priority-based load-adaptive preamble separation random access for QoS-differentiated services in 5G networks // Journal of Network and Computer Applications, 2022. No. 203. P.103396.

6. *Vilgelm M., Linares S. R., Kellerer W.* Enhancing cellular M2M random access with binary countdown contention resolution // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE, 2017. P. 1-6.

7. *Song S., Seo J. B., Jin H.* Online control of two-step random access: A step towards umtc // 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE, 2023. P. 1-6.

8. *Alvi, Maira.* Mini-slot based access barring scheme for IoT networks // Human-Centric Computing and Information Sciences, 2023. No.13.

9. *Alvi M., Toor W. T.* Mini-Slot Based Access Barring Scheme for IoT Networks // Human-centric Computing and Information Sciences Journal, 2023. Vol. 13, pp. 13-32.

10. *Jin H., Toor W. T.* Recursive pseudo-Bayesian access class barring for M2M communications in LTE systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017. Vol. 66, No. 9, pp. 8595-8599.

11. *Mostafa A. E.* Aggregate preamble sequence design and detection for massive IoT with deep learning // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. Vol. 70. No. 4, pp. 3800-3816.

12. *Kim J.* Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges // IEEE Network, 2020. Vol. 35. No. 1, pp. 273-279.

13. *Peralta E.* Two-step random access in 5G new radio: Channel structure design and performance // 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), IEEE, 2021. P. 1-7.

14. *Zhou H.* Analyzing novel grant-based and grant-free access schemes for small data transmission // IEEE Transactions on Communications, 2022. Vol. 70. No. 4, pp. 2805-2819.

15. *Zhao X., Dai L.* Connection-based Aloha: Modeling, optimization, and effects of connection establishment // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023. Vol. 23. No. 2, pp. 1008-1023.

16. *Burkov, Artem, Alexey Frolov, and Andrey Turlikov.* Contention-based protocol with time division collision resolution // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, 2018.

ANALYSIS TYPES OF BACKOFF FROM 2-STEP TO 4-STEP RANDOM ACCESS PROCEDURE

Roman O. Rachugin, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,
rro1699@gmail.com

Abstract

Currently, the active deployment and development of cellular networks of the fifth generation communication standard (5G) is underway, while scientific discussions are ongoing regarding the architectural features and key technologies of the next generation of wireless networks. Within the framework of these standards, considerable attention is paid to the application scenarios of the Internet of Things (IoT). In mIoT systems, the main data transfer scenario is the massive Machine-Type Communication (mMTC) scenario. One of the main requirements for the mMTC scenario is the ability to process a potentially unlimited number of devices. The development trend of this scenario assumes an increase in the number of devices within the operation of one access point. A large number of devices necessitates the use of random multiple access methods for transmission over a common channel. In this case, the requirements for the performance indicators of future generations of wireless communication systems increase, such as: throughput, device connection density, data transmission delay. Modern networks use a 4-step random access procedure. However, using the 4-step procedure in the context of a massive Machine-Type Communication scenario has a number of disadvantages: a large volume of transmitted service messages in relation to the transmitted information from IoT devices, an increase in transmission time due to later detection of collisions. New wireless network standards (5G NR) add the ability to use a 2-step random access procedure, which reduces the number of service messages. However, in some cases this random access procedure also has disadvantages: an increased probability of data collision. Therefore, a number of works describe the possibility of backoff from a 2-step procedure to a 4-step procedure, provided that a fallback RAR is received. There is no precise formulation of such a backoff. In this paper, several types of such a backoff are proposed and a comparative analysis of these transitions is carried out. Based on the results of the analysis, it is concluded that some types of backoff are the most promising for possible use in random access procedures of future generations of wireless networks.

Keywords: 2-step procedure random access, throughput, 4-step procedure random access, mMTC, IoT

References

- [1] W. T. Toor, "Evolution of random access process: From Legacy networks to 5G and beyond," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022. Vol. 33. No. 6. P. E3776.
- [2] Yang Bei, "Intelligent random access for massive-machine type communications in sliced mobile networks," *Electronics*, 2023. No. 2. PP. 329.
- [3] Segura David, "5G early data transmission (Rel-16): Security review and open issues," *IEEE Access*, 2022. No. 10, pp. 93289-93308.
- [4] W. C. Wang, "Low Latency Signature-Based 4-Step Random Access Procedure for Massive Machine-Type Communications," *Journal of Mobile Multimedia*, 2024. Vol. 20. No. 1. PP. 213-238.
- [5] H. Althumali, M. Othman, "Priority-based load-adaptive preamble separation random access for QoS-differentiated services in 5G networks," *Journal of Network and Computer Applications*, 2022. No. 203. P. 103396.
- [6] M. Vilgelm, S. R. Linares, W. Kellerer, "Enhancing cellular M2M random access with binary countdown contention resolution," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [7] S. Song, J. B. Seo, H. Jin, "Online control of two-step random access: A step towards umtc," *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2023, pp. 1-6.
- [8] Maira Alvi, "Mini-slot based access barring scheme for IoT networks," *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 2023. No.13.
- [9] M. Alvi, W. T. Toor, "Mini-Slot Based Access Barring Scheme for IoT Networks," *Human-centric Computing and Information Sciences Journal*, 2023. Vol. 13, pp. 13-32.
- [10] H. Jin, W. T. Toor, "Recursive pseudo-Bayesian access class barring for M2M communications in LTE systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. Vol. 66, No. 9, pp. 8595-8599.
- [11] A. E. Mostafa, "Aggregate preamble sequence design and detection for massive IoT with deep learning," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70. No. 4, pp. 3800-3816.
- [12] J. Kim, "Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges," *IEEE Network*, 2020. Vol. 35. No. 1, pp. 273-279.
- [13] E. Peralta, "Two-step random access in 5G new radio: Channel structure design and performance," *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, IEEE, 2021, pp. 1-7.
- [14] H. Zhou, "Analyzing novel grant-based and grant-free access schemes for small data transmission," *IEEE Transactions on Communications*, 2022. Vol. 70. No. 4, pp. 2805-2819.
- [15] X. Zhao., L. Dai, "Connection-based Aloha: Modeling, optimization, and effects of connection establishment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023. Vol. 23. No. 2, pp. 1008-1023.
- [16] Artem Burkov, Alexey Frolov, and Andrey Turlikov, "Contention-based protocol with time division collision resolution," *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE, 2018.

Information about author:

Roman O. Rachugin, postgraduate student of the Department № 25 of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Saint Petersburg, Russia. ORCID 0000-0001-5813-3867

МНОГОАДРЕСНАЯ РАССЫЛКА МУЛЬТИМЕДИЙНОГО КОНТЕНТА И АДРЕСНАЯ ДОСТАВКА В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ 4G/5G: МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА И РАСЧЕТ ЗОНЫ ПОКРЫТИЯ

Мелихов Егор Олегович,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
e.o.melikhov@edu.mtuci.ru

Строганова Елена Петровна,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
es@radiotest-mtuci.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-41-50

Manuscript received 26 July 2025;
Accepted 14 October 2025

Ключевые слова: мультимедийный трафик,
топология сети, одноадресная сеть,
широковещательная технология, 4G, 5G

В статье рассматривается задача передачи данных в условиях мультизонового покрытия сетей 4G и 5G, что весьма актуально при растущем спросе абонентов на разнообразные категории поставляемого контента. Особое внимание уделяется интеграции многоадресной и адресной доставки информации, что напрямую влияет на эффективность использования сетевых ресурсов и качество обслуживания пользователей. Современные системы мобильной связи сталкиваются с растущим потреблением мультимедийного контента и необходимостью управления ограниченными ресурсами мобильного оператора в условиях высокой загрузки сети. Целью исследования является оценка комбинированного подхода, включающего широковещательную передачу мультимедийного контента и адресную доставку данных. Предложена новая концепция доставки мультимедийных данных для многоадресного сегмента включая топологию, перенос рабочих частот в менее загруженные диапазоны, а также технологию доставки данных. Концепция включает топологию сети, перенос рабочих частот в менее загруженные радиочастотные диапазоны и оптимизацию технологии передачи данных в сетях 4G и 5G. Проведенные расчеты для мультизоновой системы показали увеличение площади зоны покрытия и повышение эффективности использования частотного ресурса. Основные результаты подтверждают повышение эффективности использования сетевых ресурсов, расчет оптимальных параметров зоны покрытия и снижение вероятности отказа за счет адаптивного распределения нагрузки. Выявлены новые возможности для развития гибридных сетевых архитектур, которые сочетают широковещательные и персонализированные сервисы. Полученные результаты подтверждают, что интеграция многоадресных и одноадресных технологий доставки контента является перспективным направлением для развития мобильной связи. Результаты исследования могут быть внедрены операторами мобильной связи для повышения качества обслуживания абонентов и надежности мобильной связи.

Информация об авторах:

Мелихов Егор Олегович, Московский Технический Университет Связи и Информатики, аспирант, Москва, Россия
Строганова Елена Петровна, Московский Технический Университет Связи и Информатики, д.т.н., профессор, Москва, Россия

Для цитирования:

Мелихов Е.О., Строганова Е.П. Многоадресная рассылка мультимедийного контента и адресная доставка в мобильных сетях 4G/5G: методы эффективного использования частотного спектра и расчет зоны покрытия // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 41-50.

For citation:

E.O. Melikhov, E.P. Stroganova, "Multicast of multimedia content and targeted distribution in 4G / 5G mobile networks: frequency spectrum optimizing methods and coverage area calculating," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.11, pp. 41-50. (in Russian)

1 Введение

С развитием мобильных технологий и появлением всё более совершенных абонентских устройств была разработана транспортная система, соответствующая концепции сетей нового поколения, и предназначенная для передачи мультимедийного трафика. Однако по мере роста нагрузки на сеть, которая будет только увеличиваться, возникают определённые сложности. Поскольку все сервисы работают на одной и той же инфраструктуре, между ними возникает конкуренция за ограниченные ресурсы сети. Кроме того, каждый сервис выдвигает свои технологические требования к ресурсам, что дополнительно усложняет ситуацию.

В условиях современного мира качество предоставляемых услуг (Quality of Service, QoS) и пользовательский опыт (Quality of Experience, QoE) становятся ключевыми факторами. Ресурсно-сервисная модель предполагает, что услуги должны быть на высочайшем уровне, а пользователи должны получать только положительные эмоции от взаимодействия с ними. Растущий спрос на разнообразные категории поставляемого контента заставляет мобильных операторов искать новые технические решения, которые позволят улучшить качество доставки и снизить нагрузку на сеть [1-7].

Традиционные подходы к управлению сетевыми ресурсами, основанные на жестком разделении услуг, становятся неэффективными в условиях растущего объёма мультимедийного трафика. Данный факт особенно заметен в мультисетевых сетях, где комбинированное покрытие (макро-, микросоты, indoor-решения) требует динамической адаптации к изменяющимся условиям. При таких сценариях ключевую роль играют гибридные сети, которые позволяют объединить широкоэмитерные и персонализированные сети доставки данных.

Данная статья сосредоточена на рассмотрении реализации мультисетевой сети распространения контента через совместное использование широкоэмитерного и одноадресного сегмента в рамках единой сети оператора мобильной связи с использованием алгоритма распределения контента по сегментам сети. Изучение современных публикаций показывает, что существующие решения фокусируются либо на оптимизации одноадресного трафика, либо на широкоэмитерной рассылке, игнорируя их синергетический потенциал [8-13]. В отличие от них, данная работа, как и статьи [14-18], предлагает комплексный подход, при котором рассматривается применение агрегации слотов (Slot Aggregation) и кодирования (Channel Coding) для расширения возможностей широкоэмитерного подхода распространения контента. Агрегация слотов повышает эффективность использования частотного спектра за счет объединения временных интервалов для передачи данных. Кодирование каналов минимизирует потери информации в условиях помех и многолучевого распространения сигнала.

2 Современные форматы многоадресного вещания в сетях мобильной связи

Рассмотрим существующие технологии доставки мультимедийного контента. В рамках стандарта 4G многоадресное вещание предусмотрено при использовании LTE-

eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service), которое в свою очередь работает в качестве одночастотной сети (SFN, Single-frequency network), реализованной в одном диапазоне, используя определенные частоты, выделенные из ограниченного диапазона частот LTE-сети мобильного оператора. Предоставленные мобильным оператором частоты предназначены для передачи большого объёма данных в определённых зонах покрытия, где все базовые станции (БС) работают в составе SFN, как показано на рисунке 1.

Все БС передают одни и те же данные в единые временные интервалы, то есть этот фрагмент сети функционирует как одна большая БС. Такая сеть позволяет реализовать потенциал широкой вариативности конфигураций как в виде небольшой зоны вещания, состоящей из одной или нескольких БС, покрывающих квартал города, или же охватывать большую территорию – город, область, федеральный округ или даже страну. В одной сети могут сосуществовать как широкоэмитерные, так и обычные каналы, при этом ограниченные радиочастотные ресурсы могут динамически перераспределяться между каналами распространения контента в зависимости от возможностей мобильного оператора [19].

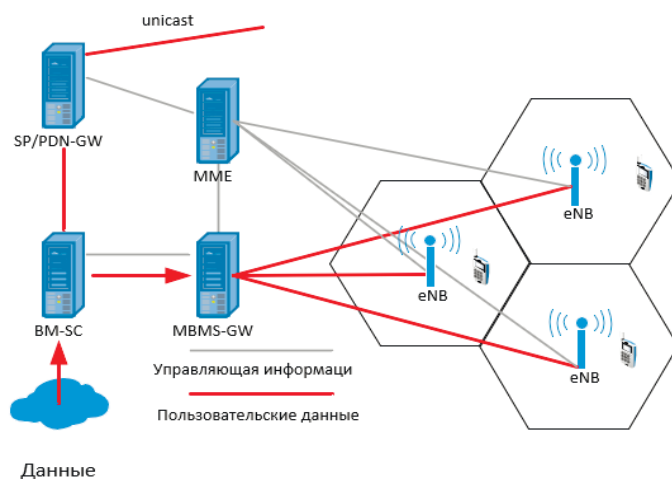


Рис. 1. Архитектура вещания LTE-Broadcast

Развитие беспроводных сетей поколения 5G направлено на предоставление широкого спектра услуг при обеспечении высокой скорости передачи данных. Постоянный и непрерывный рост мобильных устройств и приложений, сопровождаемый увеличением требований к пропускной способности, вынуждает технологии 5G поддерживать значительные объёмы передачи данных. Ключевым аспектом для архитектуры физического уровня таких систем является определение физических характеристик радиоинтерфейса.

Для сети 5G физические характеристики отличаются следующими показателями: спектральная эффективность в нисходящей линии 30 бит/с/Гц, пиковые скорости передачи данных 20 Гбит/с для нисходящей линии связи, задержка в 1 мс при поддержке мобильности в 500 км/ч и поддержка полосы пропускания до 1 ГГц при пропускной способности около 10 Мбит/с/м². Показатели для восходящей линии не указаны, поскольку технологии 4G/LTE-A/eMBMS не предусматривает дуплексную работу. Для передачи применяется технология временного распределения OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

В сетях 4G для передачи данных применяется метод модуляции, основанный на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiple). Однако у этого широко распространённого метода есть недостатки, такие как снижение спектральной эффективности из-за высоких боковых лепестков и строгие требования к синхронизации. В сетях 5G разрабатываются новые методы модуляции, направленные на улучшение качества связи.

Далее рассмотрим технические решения, направленные на оптимизацию многоадресной доставки контента абонентам в рамках концепции технологии 4G/LTE-A/eMBMS:

А) Агрегация слотов

В сетях 4G каждый временной интервал передачи (TTI, Time To Interactive) строится на двух основных компонентах: физическом канале управления нисходящей передачей (PDCCH, Packet Data Control Channel) и физическом канале для нисходящей передачи данных (PDSCH, Physical Downlink Shared Channel). PDCCH служит для передачи управляющей информации, включая планирование и управление доступом, занимая до 20% символов в подкадре (3 из 14), в то время как PDSCH используется для передачи пользовательских данных. Мобильные устройства (UE) считывают PDCCH, чтобы определить расположение своих данных в PDSCH. Однако постоянное присутствие PDCCH в каждом подкадре создаёт накладные расходы, снижая эффективность использования спектра, особенно в ширококвещательных сценариях, где требуется одновременная доставка контента множеству пользователей в разных зонах покрытия.

Агрегация слотов 4G



■ PDCCH, Packet Data Control Channel
■ PDSCH, Physical Downlink Shared Channel

Агрегация слотов 5G



Рис. 2. Отличия в агрегации слотов между 4G и 5G

В сетях 5G для решения этой проблемы внедрена агрегация временных интервалов, которая оптимизирует ресурсы за счёт динамического регулирования управляющими сигналами. Базовые станции 5G (gNB) сохраняют данные нисходящего канала в буфере, анализируя объём трафика для каждого UE. Если устройству требуется передать большой объём данных (например, видео), gNB назначает PDCCH только в первом временном интервале, выделяя несколько слотов для передачи. Начиная со второго интервала, PDCCH отключается, и все 14 символов подкадра используются исключительно для передачи данных через PDSCH, что устраняет служебные расходы на управляющие сигналы, повышая пропускную способность и спектральную эффективность [20].

Такой подход особенно актуален для мультизональных сетей, где комбинируются макросоты и микросоты для плотной городской застройки. Агрегация слотов позволяет адаптировать ширококвещательный трафик под разные зоны:

использовать низкие частоты для удалённых регионов и миллиметровые волны для высокоскоростных сценариев. Это не только снижает задержки и улучшает качество обслуживания, но и освобождает ресурсы для фоновых задач, обеспечивая баланс между эффективностью и надёжностью в условиях растущего спроса на мультимедийный контент.

Б) Оптимизация ширококвещательного сегмента в мультизональных сетях через LDPC и полярные коды

В сетях 5G ключевым элементом улучшения ширококвещательного сегмента стало внедрение кодов проверки чётности низкой плотности (LDPC, Low-density parity-check code) и полярных кодов, которые превосходят традиционные турбокоды по эффективности. LDPC-коды демонстрируют повышенную устойчивость к ошибкам при передаче крупных транспортных блоков данных, что делает их оптимальными для ширококвещательных сервисов в мультизональных сетях, где требуется одновременная рассылка контента (например, стриминг или обновление программного обеспечения) на большие расстояния. Однако для контрольного трафика, не использующего крупные блоки, LDPC менее эффективен, поэтому в 5G применяются полярные коды. Эти коды, основанные на списочном декодировании (SC-List), способны приближаться к пределу Шеннона, обеспечивая выигрыш в 0,5 дБ по сравнению с турбокодами, что критично для управления трафиком в условиях высокой интерференции и динамической нагрузки [20].

В мультизональных сетях, сочетающих макро- и микросоты, такое разделение кодов позволяет гибко адаптироваться к требованиям разных зон: LDPC используется для высокоскоростной передачи в плотно населённых районах, а полярные коды для надёжного управления соединениями в удалённых или интерференционно-нагруженных регионах. Данное решение не только повышает спектральную эффективность и снижает задержки, но и оптимизирует использование ресурсов, освобождая каналы от избыточной служебной информации.

В результате, комбинация LDPC и полярных кодов становится ключевым инструментом для масштабируемых ширококвещательных рассылок, обеспечивая баланс между скоростью, надёжностью и адаптивностью в условиях растущего спроса на мультимедийный контент.

Современным развитием технологии MBMS является FeMBMS (Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) [19]. Технология FeMBMS стала логическим развитием предыдущей технологии eMBMS и была разработана для удовлетворения новых требований к многоадресной передаче данных в сетях LTE и 5G. Основной целью разработки FeMBMS было преодоление ограничений eMBMS и адаптация технологии к новым сценариям использования, таким как трансляция видео высокой четкости (HDTV, 4K) и массовые рассылки данных в условиях высокой плотности абонентов.

Технология FeMBMS обеспечивает:

- поддержку большего расстояния между станциями благодаря использованию циклического префикса 200 мкс;
- мешанную MBMS/одноадресную передачу;
- специализированную передачу MBMS;
- новый тип подкадров;
- режим только приема и возможность бесплатной передачи.

Последним представленным этапом развития для технологии 5G является разработанная технология 5MBS (5G Multicast/Broadcast Services) [21], которая представляет собой дальнейшее развитие FeMBMS. Технология 5MBS решает ключевые задачи современных сетей связи, такие как массовая доставка контента высокого качества (например, видео 4K/8K), трансляция спортивных событий, обновления программного обеспечения для устройств IoT и другие сценарии, где требуется одновременная передача одного потока данных множеству пользователей.

Основные отличия между FeMBMS и 5MBS в подходе физической реализации передачи контента заключаются в:

1) структуре кадра: FeMBMS использует фиксированные MBSFN подкадры, тогда как 5MBS предлагает гибкую структуру с динамическим распределением ресурсов;

2) использовании радиочастотных ресурсов: FeMBMS менее эффективна в использовании спектра, тогда как 5MBS поддерживает динамическое распределение ресурсов;

3) методах модуляции: 5MBS поддерживает более современные методы модуляции, что обеспечивает более высокую пропускную способность;

4) зоне покрытия: 5MBS использует SFN в сочетании с beamforming, что увеличивает зону покрытия и улучшает качество приема.

Таким образом, 5MBS представляет собой значительное улучшение по сравнению с FeMBMS, адаптированное для удовлетворения потребностей сетей 5G. Между 5MBS и FeMBMS существуют значительные отличия в подходе к физической реализации передачи контента, особенно в контексте структуры кадра и способов использования радиочастотных ресурсов. Эти различия обусловлены тем, что технология FeMBMS разработана для сетей LTE, а 5MBS — для сетей 5G. Соответственно, наибольший интерес для реализации широковещательного сегмента доставки контента в сети мобильного оператора для данного исследования представляет технология FeMBMS.

Одним из ключевых преимуществ использования FeMBMS является возможность применения большого количества OFDM-поднесущих. В частности, разнос поднесущих может быть уменьшен до 1,25 кГц, а защитный интервал увеличен до 200 мкс, что открывает перспективы для увеличения расстояния между вышками SFN-сети до 60 км, хотя на практике такой защитный интервал применяется не для увеличения расстояния, а для компенсации сильной многолучевости, но свой вклад в увеличение зоны обслуживания данное решение вносит. Кроме того, были разработаны специальные режимы передачи данных, предназначенные для вещания без конкуренции за радиочастотный спектр с использованием unicast-услуг (рис. 4).

В целях оптимизации процесса передачи данных в сетях LTE был разработан новый режим Transport-only. Он позволяет беспрепятственно передавать информацию в любом формате, в том числе данные, не соответствующие стандартам 3GPP. Для этого данные преобразуются в IP-пакеты, что позволяет различным провайдерам использовать одну и ту же сеть для предоставления разнообразных услуг.

Для того чтобы сделать технологию FeMBMS более привлекательной для пользователей и обеспечить её конкурентоспособность по сравнению с существующими вещательными сетями, предлагается вариант передачи данных только

в одном направлении, без обратной связи, позволяя использовать сервисы FeMBMS без использования SIM-карты.

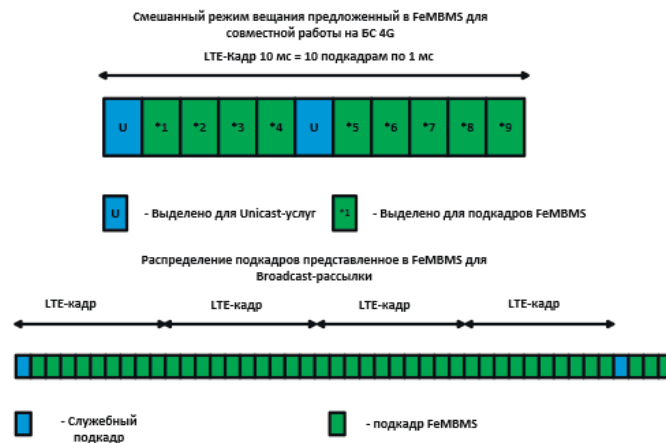


Рис. 4. Режим вещания в технологии FeMBMS

Однако внедрение FeMBMS сталкивается с определёнными сложностями. Так, для синхронизации сот необходимо использовать общие подкадры для всех каналов LTE. Кроме того, циклический префикс в подкадрах LTE составляет в максимальном варианте всего 16,6 мкс, в то время как для FeMBMS он должен быть не менее 200 мкс.

3 Использование топологии TowerOverlay для вещания мультимедийного трафика

Основная цель применения топологии TowerOverlay (TooL+) направлена на создание сети с возможностью совмещения функций сотовой и вещательной системы распространения с реализацией статического или динамического разделения спектра в рамках концепции High Tower High Power (НТНР, Высокая Башня Высокая Мощность) [22]. Топология TowerOverlay представляет собой сетевое решение для передачи многоадресных данных совместно с эффективной передачей вещательных сигналов. Такое решение направлено на снятие ограничения классической сотовой сети в необходимости задействования множества площадок для размещения оборудования.

В отличие от LTLP-сети (Low Tower Low Power, Низкая Башня Низкая Мощность), где для обеспечения покрытия требуется большое количество БС с ограниченной мощностью, расположенных на небольшой высоте, технология «TooL+» позволяет оптимизировать затраты на обслуживание сети как с точки зрения энергопотребления, так и с точки зрения оборудования. Кроме того, существующая инфраструктура НТНР может быть повторно использована для передачи данных LTE-A+ благодаря использованию кадров DVB-T2 (Digital Video Broadcasting Terrestrial 2, Цифровое наземное видеовещание телевидение второго поколения), зарезервированных для будущего использования (FEFs, Future Extension Frames) (рис. 5). Хотя стандарт DVB-T2 предполагает возможность приёма на мобильные устройства, в настоящее время ещё не произошло массового внедрения встроенных радиоприёмных модулей DVB-T2 в смартфоны и планшеты [26, 27]. Однако благодаря стандарту LTE-Advanced, есть возможность минимизировать изме-

нения в конструкции существующих чипсетов LTE, избегая необходимости установки дополнительных тюнеров радиоприёмных модулей DVB-T2.

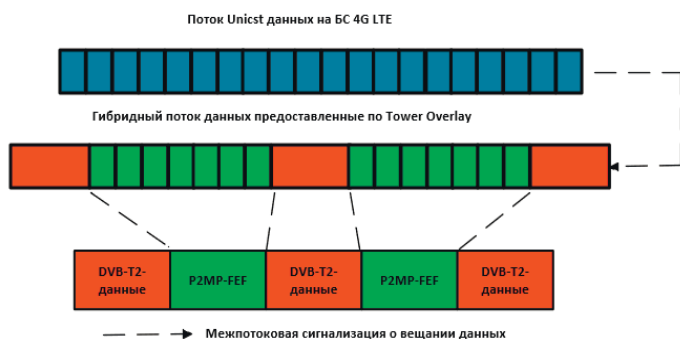


Рис. 5. Схема частотно-временного распределения DVB-T2/P2MP

Одним из ключевых нововведений является использование более длинного циклического префикса (CP), который оптимизирован для работы в условиях высокой плотности передачи данных. Это позволяет обеспечить более эффективное использование спектра и улучшить качество передачи данных.

Для минимизации дополнительных затрат, связанных с увеличением CP, также происходит увеличение длины OFDM символа за счёт уменьшения расстояния между поднесущими, что позволяет сохранить структуру формирования кадра LTE. Однако уменьшение интервала поднесущей ограничено целым делителем, что обеспечивает целостность и надёжность системы.

В контексте расширения временного интервала, каждый подкадр LTE, составляющий 1 мс, будет включать в себя всего два OFDM-символа вместо прежних двенадцати. Технология «Tower Overlay» использует опорные сигналы MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network, одночастотная сеть многоадресной и широковещательной передачи) для каждого OFDM-символа. Расстояние между двумя опорными несущими в частотной области было определено равным шести поднесущим, при этом смещение в три поднесущих происходило в каждом втором символе [23, 24].

С внедрением технологии FeMBMS различие между сигналами мобильной связи и цифрового телевидения по стандарту DVB-T2 стало практически несущественным. Это создаёт предпосылки для интеграции указанных технологий в единую архитектуру вещания. Представляется перспективным сочетание подходов, реализованных в системах TowerOverlay и FeMBMS, что открывает возможности для формирования новой концепции доставки мультимедийного контента.

Основой данной концепции выступает использование топологии TowerOverlay, ориентированной на перераспределение нагрузки за счёт перевода вещательного трафика в менее загруженные частотные поддиапазоны. Также в её рамках применяется разработанный в рамках стандарта FeMBMS режим передачи, основанный на принципах HTPP, позволяющий повысить устойчивость приёма и охват территории при снижении интерференционной нагрузки в сетях мобильной связи.

Анализ показал, что реализация данного подхода в мультизоновых сетях мобильных операторов обеспечивает значительный рост эффективности использования доступных ресурсов, включая радиочастотный спектр и инфраструктурные мощности. При этом возрастает необходимость в повышении производительности вычислительных компонентов ядра сети, обусловленная усложнением алгоритмов распределения и управления потоками данных.

Особое внимание уделено роли многоадресных технологий, которые, выступая в качестве дополнения к одноадресной передаче, позволяют существенно снизить нагрузку на соответствующий сегмент сети. Преимущество такого подхода особенно заметно в условиях неоднородного покрытия, характерного для современных мультизоновых сетей, где требуется гибкая балансировка ресурсов между зонами с различной плотностью абонентского оборудования.

На рисунке 6 представлена схема частотно-временного распределения, которая легла в основу разработанной концепции. Важным элементом является также интеграция механизма обратной связи с пользовательским оборудованием через сети 4G, обеспечивающая возможность динамической корректировки параметров вещания.

Данное решение направлено на оптимизацию использования радиочастотного ресурса в реальном времени в сетях пятого поколения и повышать качество предоставляемых услуг.

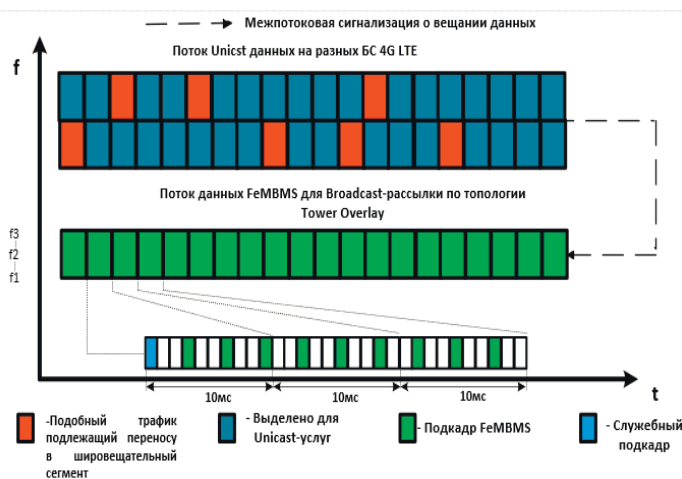


Рис.6. Схема частотно-временного распределения мультизонового вещания при совместном использовании технологии FeMBMS и Tower Overlay

В результате у мобильного оператора образуется потенциал взаимодействия топологии с использованием оборудования LTE-Advanced и 5G совместно с представленной концепцией реализации широковещательного сегмента [25]. Это позволяет в сети мобильной связи реализовать мультизоновое покрытие, подразделенное на широковещательный и одноадресный сегмент, в которых применяются средства доставки 4G и 5G (рис. 7).

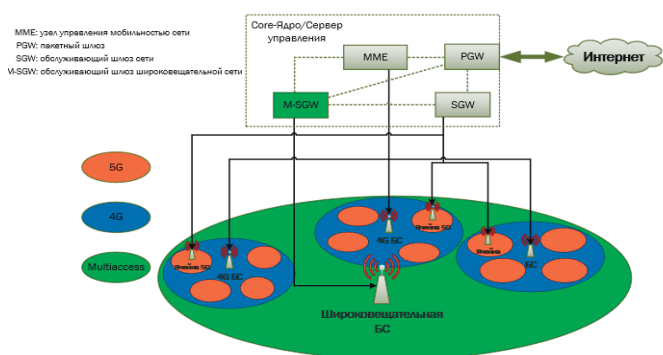


Рис. 7. Мультизональное распределение покрытия в сети мобильного оператора

4 Расчет зоны покрытия широкополосного сегмента мультизональной сети

Для демонстрации потенциала предложенного подхода был проведен расчет зоны покрытия широкополосного сегмента мультизональной системы мобильной связи, предназначенной для предоставления контента абонентам. В методике расчета применяются следующие положения:

1) На территории Российской Федерации для мобильной связи 4G используются частотные диапазоны, представленные в таблице 1. Операторами мобильной связи наиболее активно используются для предоставления одноадресных услуг диапазоны Band 1, Band 3, Band 7. Соответственно использование данных диапазонов для широкополосной доставки контента не является целесообразным ввиду чрезмерной загруженности, и, следовательно, наиболее перспективно использовать диапазоны Band 20 и Band 31.

2) Мощность передатчика для технологии LTE-Advanced для применения в широкополосном сегменте согласно Решению ГКРЧ № 17-44-06 составляет не более 43 дБм (20 Вт) при коэффициенте усиления антенны 19 дБ. Согласно ГОСТ Р 55696-2013 и решению ГКРЧ № 15-35-04 для цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T/T2 мощность передатчика может быть увеличена до 10 кВт.

Таблица 1

Частотные диапазоны, используемые операторами мобильной связи в Российской Федерации

Номер диапазона	Диапазон, МГц	Режим дуплекса	Особенности использования
Band 1	2100 UL: 1920-1980 DL: 2110-2170	FDD	Использовался ранее в сетях UMTS, в настоящее время в сетях LTE
Band 3	1800 UL: 1710-1785 DL: 1805-1880	FDD	Широко используется в сетях LTE, особенно в регионах
Band 7	2600 UL: 2500-2570 DL: 2620-2690	FDD	Используется для высокоскоростного интернета в городах
Band 20	800 UL: 832-862 DL: 791-821	FDD	Используется в удаленных и сельских районах
Band 31	450 UL: 452,5-457,5 DL: 462,5-467,5	FDD	Очень хорошее покрытие
Band 38	2600 UL/DL: 2570-2620	TDD	Используется в основном в крупных городах (Москва, СПб)

Методика расчета

При расчете используется подход НТНР, предусматривающий вариативность высоты подвеса антенны БС в центре зоны обслуживания.

Расчет радиуса зоны обслуживания основан на принципе минимальной приемлемой напряженности поля для мощности передатчика 20/40/100/120/200 Вт. При этом учтены все необходимые потери и поправочные коэффициенты, включая затухание сигнала, влияние частоты и параметры антенны. Используется формула расчета потерь для свободного пространства (FPLS, Free Space Path Loss), дополнительно в методике расчета учтен фактор высоты подвеса антенны:

$$L_p = 32,44 + 20 \lg(R) + 20 \lg(f_0) + 20 \lg\left(\frac{1000}{h_t}\right) \quad (1)$$

где L_p - основные потери на трассе (дБ), R - расстояние между передающей и принимающей антенной (км), f_0 - рабочая частота системы (МГц), h_t - высота подвеса передающей антенны над уровнем земли (м).

Расчет радиуса зоны покрытия по формуле (1) приводит к чрезмерно высоким значениям. Для определения радиуса зоны покрытия применяется Рекомендация МСЭ-R P.1546-6 [32], расчет проводится по формулам (2) - (6).

Эффективная изотропно излучаемая мощность EIRP (EIRP, Effective Isotropic Radiated Power):

$$EIRP = P_{\text{Пд}} + G_t - \eta_f \quad (2)$$

где $P_{\text{Пд}}$ - мощность передаваемого сигнала от БС (в дБВт), G_t - усиление антенны передатчика (в дБ), η_f - потери на кабельном фидере между передатчиком и антенной (в дБ).

Для расчета влияния дополнительных потерь применяется отношение, которое включает следующие формулы:

$$E_p = EIRP - E_{\text{min}} + C_L \quad (3)$$

где E_p - максимальное значение напряженности поля, которое может быть достигнуто на заданном расстоянии с учётом поправок, C_L - поправочный коэффициент на местоположение.

Медианное значение напряженности поля для 50% времени и 50% пространства $E(50,50)$ определяется выражением:

$$E(50,50) = E(50,1) + \Delta E(t) \quad (4)$$

где $E(50,1)$ - медианное значение напряженности поля для 50% времени и 1% пространства, $\Delta E(t) = (15...18)$ дБ в зависимости от климата и типа местности (для умеренного климата и городской среды $\Delta E(t) = 15$ дБ).

Напряженность поля помехи от мешающего передатчика:

$$E_{\text{помехи}} = EIRP_{\text{меш}} - L_p(R) \quad (5)$$

где $EIRP_{\text{меш}}$ - эффективная изотропная излучаемая мощность сторонней передающей станции, $L_p(R)$ - потери на трассе между передатчиком и приёмником, зависящие от расстояния R . Все эти переменные необходимы для проверки условия защиты от помех:

$$E_p - E_{\text{помехи}} \geq A_{RCH} + \Delta A \quad (6)$$

где A_{RCH} – минимально допустимое отношение сигнал/помеха, ΔA – поправка на дополнительную защиту системы от помех.

Результаты расчетов

Расчеты радиуса зоны покрытия выполнены на частоте 800 МГц с учетом параметров антенны, мощности передатчика и требований к качеству сигнала, с использованием кривых напряженности поля в зависимости от высоты передающей антенны (для 1% времени), представленных в Рекомендации МСЭ-R P.1546-4. Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета

Рабочая частота	$f = 800$ МГц
Коэффициент усиления передающей антенны:	$G_t = 11.7$ дБ
Мощность передатчика	$P_{Пд} = 20/40/100/120/200$ Вт
Высота базовой станции	$h_t = 30/50/100/200/400/500$ м
Высота приемной антенны	$h_r = 1,5$ м
Потери фидера снижения передающей антенны	$\eta_f = 2$ дБ
Минимальное значение напряженности поля	$E_{min} = 60$ дБ(мкВ/м)
Минимально допустимое отношение сигнал/помеха	$A_{RCH} = 22$ дБ
Поправка к защитному отношению	$\Delta A = 1$ дБ
Мощность передатчика мешающей станции	$P_{меш} = 25$ дБВт
Поправочный коэффициент на местоположение	$C_L = 9$ дБ
Напряженность поля для 50% мест и 1% времени	$E(50,1) = 27$ дБ(мкВ/м)

Полученные в результате расчета по формулам (1)-(6) для определения радиуса зоны покрытия согласно Рекомендации МСЭ-R P.1546-6 для свободного пространства данные (табл. 3) показывают, что технология НТНР имеет потенциал для использования благодаря большой зоне покрытия.

Таблица 3

Радиус зоны покрытия в зависимости от высоты подвеса передающей антенны для $P_{Пд}=40$ Вт

Высота подвеса антенны, м	Радиус зоны покрытия, км
50	6,5
100	9,3
200	10,9
300	15,6
450	21,4
500	23,2

Однако приведенная выше методика расчета не обладает высокой точностью в условиях городской застройки или местности с переменным рельефом. Более высокая точность достигается при применении модели Окамура-Хатта с учётом Рекомендации ITU-R P.1546 для городской среды:

$$L_p = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_t)) \times \lg(R) \quad (7)$$

где h_t – высота передающей антенны (в метрах), $h_r=1,5$ м – высота приёмной антенны (для мобильного устройства), $a(h_r)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние высоты приёмной антенны над уровнем земли h_r :

$$a(h_r) = (1,1 * \lg(f) - 0,7) * h_r - (1,56 * \lg(f) - 0,8) \quad (8)$$

Результаты расчета радиуса зоны покрытия согласно указанной модели представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результат расчета радиуса зоны покрытия согласно модели Окамура-Хатта

h_t , м	Радиус зоны покрытия, км для мощности передатчика $P_{Пд}$				
	20 Вт	40 Вт	100 Вт	120 Вт	200 Вт
30	1,6	1,9	2,5	2,7	3,1
50	1,9	2,2	2,8	3,0	3,4
100	2,5	2,9	3,7	3,9	4,5
200	3,5	4,1	5,2	5,5	6,3
400	5,3	6,2	7,9	8,4	9,6
500	5,6	6,6	8,4	8,9	10,1

Для наиболее точных расчетов зоны покрытия БС в городской среде применяется модель Уолфиша-Икегами в соответствии с соотношением:

$$L_p = L_{св.прост.} + L_{rt} + L_{sd} \quad (9)$$

где

$$L_{св.прост.} = 32,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(R)$$

$$L_{rt} = 53,7 + 17,3h_r - 10,3 \lg(w) + 0,36f - 0,7h_t$$

$$L_{sd} = 18,7 \lg(b) + 1,9(\lg(b))^2 - 10,7 + 0,3h_r$$

где w – ширина улицы, b – среднее расстояние между зданиями (плотность застройки).

Результаты расчета радиуса зоны покрытия согласно модели Уолфиша-Икегами представлены в таблице 5. Условие защиты от помех для расчета также выполняется, так как уровень помех $E_{пом} = 52$ дБ(мкВ/м) менее 53 дБ(мкВ/м).

Таблица 5

Результат расчета радиуса зоны покрытия согласно модели Уолфиша-Икегами

h_t , м	Радиус зоны покрытия, км для мощности передатчика $P_{Пд}$				
	20 Вт	40 Вт	100 Вт	120 Вт	200 Вт
30	1,0	1,2	1,6	1,7	2,0
50	1,3	1,5	1,9	2,1	2,4
100	1,7	2,0	2,6	2,8	3,3
200	2,4	2,9	3,7	4,0	4,6
400	3,2	3,8	4,9	5,3	6,1
500	3,6	4,2	5,5	5,9	6,8

Анализ результатов

В представленном исследовании проведен расчет радиуса зоны покрытия широкополосного сегмента по технологии LTE-eMBMs при максимально разрешенной мощности БС 20 Вт и типовой высоты подвеса антенны 30 м, который составил 1 км. Для предложенной в настоящей

работе улучшенной технологии Tower Overlay с зоной обслуживания мультисервисной системы мобильной связи с широкополосным сегментом при увеличении мощности передатчика и высоте подвеса антенны радиус зоны покрытия существенно возрастает (табл. 5). Расчет выполнен для цифровой модуляции 64-QAM на частоте 800 МГц с учетом параметров антенны, мощности передатчика и требований к качеству сигнала.

Таким образом, результат расчета показал преимущество подхода НТНР над существующим подходом с выигрышем по радиусу зоны покрытия от 1,2 до 6,8 раз в зависимости от характеристик применяемого оборудования.

Сравнительный анализ полученных результатов показал значительное преимущество мультисервисной системы с одноадресным и широкополосными сегментами по площади покрытия.

5 Заключение

В настоящей работе представлено исследование, посвященное интеграции многоадресной рассылки мультимедийного контента и адресной доставки данных в современных мобильных сетях. На основе проведенного анализа существующих технологий широкополосной передачи данных предложена новая концепция доставки мультимедийных данных, заключающаяся в использовании топологии Tower Overlay с переносом вещания в менее загруженный частотный поддиапазон и подхода НТНР с использованием технологии FeMBMs.

Предложенная концепция позволяет достичь в рамках мультисервисной сети мобильного оператора значительного прироста эффективности использования ресурсов оператора, включая частотный спектр и сетевую инфраструктуру. Отметим, что предложенная концепция одновременно предполагает повышение требований к вычислительной мощности ядра сети. Ключевым результатом работы является то, что многоадресные технологии как дополнение точечной адресации, обеспечивают уменьшение нагрузки на одноадресный сегмент сети мобильного оператора, что особенно критично для мультисервисной сети с неоднородным покрытием.

По результатам расчета зоны покрытия широкополосного сегмента мультисервисной сети проведенное сравнение показало преимущество предложенного в концепции подхода по величине радиуса зоны покрытия в 1,2...6,8 раз (при увеличении мощности передатчика и высоте подвеса антенны) по сравнению с типовым решением широкополосной доставки в сетях 4G (технология LTE-eMBMs). Местом установки передатчика в Москве может быть Останкинская телебашня.

Полученные результаты подтверждают, что интеграция многоадресных и одноадресных технологий доставки контента является перспективным направлением для развития мобильной связи. Результаты исследования могут быть внедрены операторами мобильной связи для оптимизации топологии сетей путём снижения капитальных и эксплуатационных затрат за счет рационального использования частотного спектра.

В дальнейшем исследовании целесообразно направить на тестирование метода в условиях высокой динамики нагруз-

ки, а также на адаптацию метода под специфические требования сетей 6G.

Литература

1. *Бабкин В.А., Строганова Е.П.* Методы оценки качества передачи данных в пакетных сетях связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. №11. С. 25-31. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10322.
2. *Malkovich O.B., Grychkin S.E., Stroganova E.P.* Investigation of Portable Communication Devices with Electrochemical Power Sources Application Features // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2022. pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744368.
3. *Grychkin, S.E. Bushuev E.Y., Bolotov D.V., Kazantsev S.Y., Stroganova E.P.* Fiber-Optic Communication System Operation Under Electromagnetic Fields Influence // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017169.
4. *Bushuev E.Y., Kazantsev S.Y., Stroganova E.P., Grychkin S.E., Kuznetsov S.N.* External factors influence on quantum cryptographic communication system with atmospheric line // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2025. pp. 1-5. DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017112.
5. *Babkin V., Stroganova E., Shagrov N.* Multiservice Networks Performance Monitoring Using the Threshold Model // 2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2025. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079382.
6. *Babkin V. Stroganova E.* Monitoring of Packet Telecommunication Networks // 2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2025. pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948087.
7. *Babkin V.A. Stroganova E.P.* Integral Quality Indicators of Modern Communication Network Functioning // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. pp. 1-5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166051
8. *Montalban J. et al.,* Broadcast Core-Network: Converging Broadcasting with the Connected World // IEEE Transactions on Broadcasting. 2021. V. 67. N 3. pp. 558-569. DOI: 10.1109/TBC.2021.3105026.
9. *Du J., Song J., Ren Y., Wang J.* Convergence of broadband and broadcast/multicast in maritime information networks // Tsinghua Science and Technology. 2021. Vol. 26, No. 5. Pp. 592-607. DOI: 10.26599/TST.2021.9010002.
10. *Lehr W., Queder F., Haucap J.* 5G: A new future for Mobile Network Operators, or not? // Telecommunications Policy. 2021. V. 45, N 3. 102086.
11. *Säily M., Estevan C., Gimenez J., Tesema F., Guo W., Gomez-Barquero D., Mi De.* 5G Radio Access Network Architecture for Terrestrial Broadcast Services // IEEE Transactions on Broadcasting. 2020. Vol. 66. No. 2, pp. 404-415. DOI: 10.1109/TBC.2020.2985906.
12. *Ahn S., Park S. -I., Lee, J. -Y. Hur and N. Kang J.* Cooperation Between LDM-Based Terrestrial Broadcast and Broadband Unicast: On Scalable Video Streaming Applications// IEEE Transactions on Broadcasting. 2021. V. 67, N. 1. pp. 2-22. DOI: 10.1109/TBC.2020.3028331.
13. *Gabilondo A., Morgade J., Viola R., Angueira P., Montalbán J.* Realising a vRAN based FeMBMS Management and Orchestration Framework // 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). 2020, pp. 1-7. DOI: 10.1109/BMSB49480.2020.9379891.
14. *Мелихов Е.О., Строганова Е.П.* Топология и функционирование сети мобильного оператора при комбинировании одноадресного и широкополосного сегментов. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 5. С. 29-35. doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-5-29-35.

15. Melikhov E.O., Stroganova E.P. Intelligent Management of Combined Traffic in Promising Mobile Communication Networks. // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617611
16. Stroganova E.P., Melikhov E.O. Provision of Broadcast Multimedia Content in 5G Mobile Systems Using Satellite Broadcasting // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2024. Т. 7. № 1. pp. 452-456. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496729.
17. Melikhov E.O., Stroganova E.P. Broadcast Content Distribution in 5G Mobile Networks Integrated with Satellites // 2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2025. pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948038.
18. Мелихов Е.О., Строганова Е.П. Возможности широкоэмитерного распространения медиаконтента в системах мобильной связи 5G // В сборнике: Технологии информационного общества. Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 37-38.
19. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Service Requirements for the 5G System; Stage 1 (Release 16), Tech. Rep. TS 22.261 V16.14.0, 2021.
20. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Stage 1” Tech. Rep. TS22.146 V18.0.1, March. 2024.
21. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Architectural enhancements for 5G multicast-broadcast services. Tech. Rep TS 23.247, Jan. 2021.
22. Slimani, M., Reimers, U., Robert, J., Schlegel, P. et al. Results of the DVB-T2 Field Trial in Germany. IEEE Transactions on Broadcasting. 2015. Vol. 61, No. 2, pp. 177-194.
23. ITU-R WT.1877-3 (12/2020) Методы коррекции ошибок, формирования кадров, модуляции и излучения для систем цифрового наземного телевизионного вещания второго поколения и руководство по выбору этих систем.
24. Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Статьев В.Ю. Классификация угроз безопасности персональных данных в информационных системах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 1. С. 56-60.
25. Богачков И.В. Обнаружение натяжённых участков в оптических волокнах на основе метода бриллюэновской рефлектометрии // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 12. С. 85-91.
26. Варламов О.В. Организация одночастотных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM. Особенности и результаты практических испытаний // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 11. С. 4-20.
27. Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В. Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 9. С. 9-16.

MULTICAST OF MULTIMEDIA CONTENT AND TARGETED DISTRIBUTION IN 4G / 5G MOBILE NETWORKS: FREQUENCY SPECTRUM OPTIMIZING METHODS AND COVERAGE AREA CALCULATING

Egor O. Melikhov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, e.o.melikhov@edu.mtuci.ru
 Elena P. Stroganova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, es@radiotest-mtuci.ru

Abstract

The article considers the problem of data transmission in conditions of multi-zone coverage of 4G and 5G networks, which is very important given the growing demand of subscribers for various categories of delivered content. Particular attention is paid to the integration of multicast and addressed information delivery, which directly affects the efficiency of network resources and the quality of user service. Modern mobile communication systems are faced with growing consumption of multimedia content and the need to manage the limited resources of a mobile operator under high network load. The objective of the study is to evaluate a combined approach that includes broadcast transmission of multimedia content and addressed data delivery. A new concept of multimedia data delivery for the multicast segment is proposed, including topology, transfer of operating frequencies to less loaded ranges, and data delivery technology. The concept includes network topology, transfer of operating frequencies to less loaded radio frequency ranges and optimization of data transmission technology in 4G and 5G networks. The calculations performed for a multi-zone system showed an increase in the coverage area and an increase in the efficiency of using the frequency resource. The main results confirm the increase in the efficiency of network resource use, calculation of optimal coverage area parameters and reduction of the probability of failure due to adaptive load distribution. New opportunities for the development of hybrid network architectures that combine broadcast and personalized services are identified. The obtained results confirm that the integration of multicast and unicast content delivery technologies is a promising direction for the development of mobile communications. The results of the study can be implemented by mobile operators to improve the quality of subscriber service and the reliability of mobile communications.

Keywords: multimedia traffic, network topology, unicast network, broadcast technology, 4G, 5G

References

- [1] V.A. Babkin, E.P. Stroganova, "Methods for assessing the quality of data transmission in packet communication networks," *T-Comm*. 2019. No. 11. pp. 25-31. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10322.
- [2] O.B. Malkovich, S.E. Grychkin, E.P. Stroganova, "Investigation of Portable Communication Devices with Electrochemical Power Sources Application Features," *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications*. 2022. pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744368.
- [3] S.E. Grychkin, E.Y. Bushuev, D.V. Bolotov, S.Y. Kazantsev, E.P. Stroganova, "Fiber-Optic Communication System Operation Under Electromagnetic Fields Influence," *2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017169.
- [4] E.Y. Bushuev, S.Y. Kazantsev, E.P. Stroganova, S.E. Grychkin, S. N. Kuznetsov, "External factors influence on quantum cryptographic communication system with atmospheric line," *2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2025. pp. 1-5. DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017112.
- [5] V. Babkin, E. Stroganova, N. Shagrov, "Multiservice Networks Performance Monitoring Using the Threshold Model," *2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2025, pp. 1-5. doi: 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079382.
- [6] V. Babkin, E. Stroganova, "Monitoring of Packet Telecommunication Networks," *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications*. 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948087.
- [7] V.A. Babkin, E.P. Stroganova, "Integral Quality Indicators of Modern Communication Network Functioning," *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166051
- [8] J. Montalban et al., "Broadcast Core-Network: Converging Broadcasting with the Connected World," *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2021. Vol. 67. No. 3, pp. 558-569. DOI: 10.1109/TBC.2021.3105026.
- [9] J. Du, J. Song, Y. Ren, J. Wang, "Convergence of broadband and broadcast/multicast in maritime information networks," *Tsinghua Science and Technology*. 2021. Vol. 26, No. 5, pp. 592-607. DOI: 10.26599/TST.2021.9010002.
- [10] W. Lehr, F. Queder, J. Haucap J. 5G: A new future for Mobile Network Operators, or not? // *Telecommunications Policy*. 2021. V. 45, N 3. 102086.
- [11] Saily M., Estevan C., Gimenez, F. Tesema, W. Guo, D. Gomez-Barquero, Mi De, "5G Radio Access Network Architecture for Terrestrial Broadcast Services," *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2020. Vol. 66. No. 2, pp. 404-415. DOI: 10.1109/TBC.2020.2985906.
- [12] S. Ahn, S.-I. Park, J.-Y. Lee, N. Hur and J. Kang, "Cooperation Between LDM-Based Terrestrial Broadcast and Broadband Unicast: On Scalable Video Streaming Applications," *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2021. Vol. 67, No. 1, pp. 2-22. DOI: 10.1109/TBC.2020.3028331.
- [13] A. Gabilondo, J. Morgade, R. Viola, P. Angueira, J. Montalban, "Realising a vRAN based FeMBMS Management and Orchestration Framework," *2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. 2020, pp. 1-7. DOI: 10.1109/BMSB49480.2020.9379891.
- [14] E.O. Melikhov, E.P. Stroganova, "Topology and functioning of the mobile operator's network when combining unicast and broadcast segments," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 5, pp. 29-35. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-5-29-35 .
- [15] E.O. Melikhov, E.P. Stroganova, "Intelligent Management of Combined Traffic in Promising Mobile Communication Networks," *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications*. 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617611
- [16] E.P. Stroganova, E.O. Melikhov, "Provision of Broadcast Multimedia Content in 5G Mobile Systems Using Satellite Broadcasting," *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2024. Vol. 7. No. 1, pp. 452-456. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496729.
- [17] E.O. Melikhov, E.P. Stroganova, "Broadcast Content Distribution in 5G Mobile Networks Integrated with Satellites," *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications*. 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948038.
- [18] E.O. Melikhov, E.P. Stroganova, "Possibilities of broadcast distribution of media content in 5G mobile communication systems," *In the collection: Information Society Technologies. Proceedings of the XVIII International Industrial Scientific and Technical Conference*. Moscow, 2024, pp. 37-38.
- [19] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Service Requirements for the 5G System; Stage 1 (Release 16), Tech. Rep. TS 22.261 V16.14.0, 2021.
- [20] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Stage 1" Tech. Rep. TS22.146 V18.0.1, March. 2024.
- [21] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Architectural enhancements for 5G multicast-broadcast services.Tech. Rep TS 23.247, Jan. 2021.
- [22] M. Slimani, U.Reimers, J. Robert, P. Schlegel, et al., "Results of the DVB-T2 Field Trial in Germany" *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 61 (2015), No. 2, pp. 177-194
- [23] ITU-R BT.1877-3 (12/2020) Error correction, framing, modulation, and emission methods for second-generation digital terrestrial television broadcasting systems and guidelines for selecting these systems.em.
- [24] V.A. Dokuchaev, V.V. Maklachkova, V.Yu. Statev, "Classification of personal data security threats in information systems," *T-Comm*, 2020, vol. 14, no.1, pp. 56-60.
- [25] I.V. Bogachkov, "A detection of strained sections in optical fibers on basis of the brillouin relectometry method," *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No.12, pp. 85-91.
- [26] O.V. Varlamov, "Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.11, pp. 4-20.
- [27] O.V. Varlamov, V.O. Varlamov, A.V. Dolgopyatova, "DRM broadcasting international network to create an information field in the Arctic region," *T-Comm*, 2019. vol. 13, no.9, pp. 9-16.

Information about authors:

Egor O. Melikhov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Postgraduate student, Moscow, Russia

Elena P. Stroganova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Professor, Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF LABOR INPUTS IN IMPORT SUBSTITUTION PROJECTS USING NEURAL NETWORK ALGORITHMS

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-51-57

Vladimir S. Makarov,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.
Alekshev, Nizhny Novgorod, Russia, makvl2010@gmail.com

Alexey V. Terentyev,
State University of Management, Moscow, Russia,
av_terentev@guu.ru

Nikita S. Akinshin,
State University of Management, Moscow, Russia,
ns_akinshin@guu.ru

Denis A. Yudin,
State University of Management, Moscow, Russia,
da_yudin@guu.ru

Manuscript received 15 August 2025;
Accepted 17 October 2025

This article has been prepared as part of a research project funded by the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of scientific, methodological and practical foundations of reverse engineering for solving complex import substitution problems in the agro-industrial complex of the Russian Federation" (code of scientific topic FZNW-2024-0026).

Keywords: AI, artificial intelligence, machine parts, import substitution, labor input optimization, neural networks, production process optimization, data processing methods, reverse engineering

Predictive assessment of the complexity of design and technological training is the basis for cost formation, determining the timing of the project and making informed management decisions about the feasibility of its launch. This article examines modern methods for automating and optimizing production processes in the import substitution of machine parts for agricultural machinery. An artificial intelligence-based algorithm has been developed to estimate labor inputs across various industries, such as general machinery, automotive, and tractor manufacturing. The analysis of factors influencing task complexity and labor intensity is conducted. Particular attention is paid to the optimization of labor inputs to reduce the lead time for manufacturing machine-building products. This approach enhances the quality and efficiency of producing domestic equivalents of machine parts and improves the accuracy of resource and timeline planning during the development and design stages.

Information about authors:

Vladimir S. Makarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekshev, Nizhny Novgorod, Russia

Alexey V. Terentyev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Management of Transport Complexes, State University of Management, Moscow, Russia

Nikita S. Akinshin, PhD Student, Specialist, Center for Engineering Project Management, State University of Management, Moscow, Russia

Denis A. Yudin, PhD Student, Specialist, Reverse Engineering Laboratory, State University of Management, Moscow, Russia

Для цитирования:

Макаров В.С., Терентьев А.В., Акиншин Н.С., Юдин Д.А. Оптимизация трудозатрат при реализации проектов импортозамещения на основе нейросетевых алгоритмов // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 51-57.

For citation:

V.S. Makarov, A.V. Terentyev, N.S. Akinshin, D.A. Yudin, "Optimization of labor inputs in import substitution projects using neural network algorithms," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 11, pp. 51-57.

Introduction

The strategic course towards achieving technological sovereignty and the need for rapid response to disruptions in production chains pose complex challenges for the modern machine-building industry related to the accelerated development and production of a new product range. In this context, reverse engineering is becoming not just one of the technical tools, but a key element of the import substitution strategy. The success of such projects is largely determined by the quality of planning at the earliest stages, when the economic foundation for future production is being laid. The central task of this stage is a predictive assessment of the complexity of design and technological training, since this assessment is the basis for cost formation, determining the timing of the project and making informed management decisions about the feasibility of its launch.

Historically, a paradigm based on the use of integrated calculation methods, such as the method of specific normalization, the method of mass accounting, multifactorial and regression analysis, has developed in engineering practice to solve this problem. These approaches are based on the hypothesis that it is possible to approximate labor intensity based on statistical data on previously manufactured analog products and their key physical or operational parameters. The effectiveness of these methods has been repeatedly confirmed in conditions of stable large-scale and mass production, characterized by a limited range and a high level of repeatability of technological processes.

However, with the transition to the conditions of modern small-scale production and, in particular, in relation to the tasks of reverse engineering, the fundamental assumptions underlying traditional approaches cease to be fulfilled. This leads to a number of system limitations that critically reduce the reliability of the estimates obtained. Firstly, the basic requirement of having a statistically significant and relevant database of analog products is violated, since reverse engineering facilities are often unique to the enterprise. Secondly, these methods demonstrate a high sensitivity to the subjective factor: the completeness of the set of parameters and the values of correction coefficients are determined by the qualifications and experience of a particular expert technologist, which introduces a systematic error into the calculations and makes the result irreproducible.

The most significant disadvantage is the inability of traditional methods to work with the primary carrier of information about the complexity of a product – its geometric and topological representation. Models that operate solely on a set of scalar parameters (mass, dimensions) completely ignore the unstructured information contained in engineering graphics (drawings, CAD models, polygonal grids after 3D scanning). This leads to the fact that two products with the same weight, but with radically different geometry complexity, will receive a similar assessment of labor intensity, which is fundamentally wrong [1].

The identified methodological gap necessitates the formation of a new scientific approach capable of overcoming these limitations. It requires a transition to a class of models capable of automatically extracting features from heterogeneous, including unstructured, data sources and approximating complex nonlinear dependencies without a priori assumptions about their form. The purpose of this paper is to present the methodological foundations and mathematical apparatus for building such a system, which makes it possible to move from subjective expert assessment to

objective, data-based predictive labor management in projects of design and technological preparation of production [2].

Materials and methods

At the initial stages of production preparation, various methods of integrated calculation are used to assess labor intensity, which allow us to obtain initial but fairly accurate estimates of the time and resources spent.

A. The method of mass accounting

This methodological approach (1) is based on the hypothesis that there is a correlation between the labor intensity of the production process and the dynamics of changes in the mass of the final product.

$$T_a + K_m = T, \quad (1)$$

where T_a – the labor intensity of a product that is an analog of the one being designed or obtained statistically for products that have common design and technological features with the analyzed product; K_m – a coefficient that takes into account differences in the size or weight of the compared structures.

B. The method of specific rationing

The method of specific rationing is a more universal methodology in comparison with the method of mass accounting. The calculation of labor costs (2) for the production of a product using the method of specific rationing involves the preliminary determination, rationing and establishment of standard labor indicators for similar product designs. It is assumed that the specific rate is the same for the analogue and the product in question.

$$(T_a/P_a) \times P = T_a^{ud} \times P = T\# \quad (2)$$

where T_a – the labor intensity of a product that is an analog of the one being designed or obtained statistically for products that have common design and technological features with the analyzed product; T_a^{ud} – the specific labor intensity of an analog product; P – the value of the main technical parameter of the product, or the beneficial effect realized by the product when used for its intended purpose; P_a – the value of the main technical parameter of the analog product.

If the mass of the product is selected as such a parameter (P), the method of specific rationing is transformed into the method of mass accounting.

C. The method of multifactorial analysis

A more accurate assessment of labor intensity is provided by the method of multifactorial analysis, which allows taking into account the impact of several key product parameters on labor intensity at once [3]. In this context, labor intensity (3) is defined as a complex function depending on the combination of these parameters.

$$T_u - K_0 = T \quad (3)$$

where T_u – the initial indicator of the labor intensity of a product of a basic (characteristic) design under certain conditions of work; K_0 – a correction factor that takes into account the impact of specific work conditions (4).

$$(K_c/K_T) \times K_{g_0} \times K_N = K_0 \# \quad (4)$$

where K_N – a coefficient that takes into account the change in T depending on the product release program;

K_{go} – a coefficient that takes into account the change in T depending on the duration of product release in production.

K_c – a coefficient that takes into account the change in T depending on the serial production of products.

K_T – a coefficient that takes into account the technological equipment of the work.

The calculations do not include the cost of performing a scan or adapting the results of polygonal models into a full-fledged 3D model. The absence of these variables makes it impossible to accurately estimate the labor costs and deadlines for reverse engineering projects.

For a preliminary assessment of the complexity of products in the early stages of reverse engineering, when the working drawings have not yet been developed, the method of element coefficients is used. This method takes into account the complexity of the reverse engineering process and allows us to obtain reasonable data on the required resources and time for the implementation of the project [4].

The number of elements and their complexity are taken as a measure of complexity in the method of element coefficients.

$$\frac{T_e}{T_e^{iss}} = K_e \quad (5)$$

where T_e – the complexity of the element; T_e^{iss} – ore intensity of the element taken as the source; K_e – the element coefficient.

Knowing the element coefficients K_{ei} and the parameters (employee's qualifications, the complexity of the part, the dimensions of the part), you can calculate the complexity and estimated labor intensity of the product in manufacturing.

$$\sum_{i=1}^I K_i N_i = K_{sl} \# \quad (6)$$

$$K_{ei} T_e^{iss} = K_e \quad (7)$$

where N_{ei} – the number of identical elements in the i th group; I – the number of groups of elements.

The regression analysis method is used to plan the time and resources needed to produce a part or product. This method uses statistical data to estimate the labor intensity of production, taking into account factors such as shape, material, and purpose of the product. The use of regression analysis helps to more accurately predict production costs and make reasonable use of resources, which makes production more efficient [5].

In the process of reverse engineering, this method allows you to create mathematical models that relate design features to the time and resources required for its production [6]. This helps not only to estimate in advance how long it will take to produce, but also to identify important factors that affect labor intensity.

The use of regression analysis also helps to optimize production processes, for example, to make decisions about which technologies and materials to use, in the process of reverse engineering, production systems are more competitive and cost-effective [7]. The correlation relationship is expressed using a multiple regression equation in two ways.

$$A \times P_1^{a_1} \times \dots \times P_n^{a_n} = T \quad (8)$$

$$A + a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_n P_n = T \quad (9)$$

where A – a certain constant that varies depending on which category the analyzed part belongs to.; $P_n \dots$ – parameters taken into account in the model; a_n – indicators (coefficients) indicating the degree of influence of the parameters P_n by the amount of labor intensity.

Further detailing of the factors is carried out by highlighting the values of the complexity of the main and auxiliary work [8]. When analyzing and evaluating labor costs using reverse engineering, it is necessary to take into account factors related to the methodology and specifics of this approach.

The calculations of this method use coefficients reflecting the degree of influence of the engineer's qualifications on the amount of labor intensity, as well as a parameter characterizing the engineer's qualifications [9].

In the calculations of this method, it is proposed to use:

- a coefficient reflecting the degree of influence of an engineer's qualifications on the amount of labor intensity;
- the parameter characterizing the engineer's qualification;
- the complexity factor of the part, which affects the complexity of the process;
- the duration factor of the 3D scan, reflecting the time required to obtain a digital model of the part;
- the drawing's occupancy rate, which takes into account the density of information in the drawing and affects the speed of its analysis;
- the format of the drawing, which can affect the convenience and accuracy of working with it, and therefore the complexity of the process.

In this case, each of the coefficients and parameters can have its own weight in the equation.

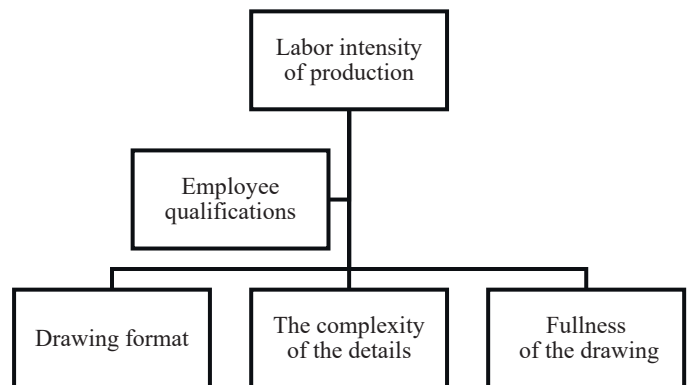


Fig. 1. Factors influencing the calculation of labor costs for reverse engineering projects

Results and discussion

The analysis of existing approaches to assessing labor intensity, including the correlation and regression method, shows their focus on establishing a formalized dependence of the type

$$T = f(P_1, P_2, \dots P_n), \quad (10)$$

where T – the total labor intensity, and P is the set of product parameters. This approach makes it possible to obtain a quantitative assessment, but its application is associated with a number of fundamental limitations that reduce accuracy and adaptability in modern small-scale and medium-scale production.

The main limitations are the a priori defined structure of functional dependence and subjectivity at the stage of feature selection. Models based on linear or polynomial regression are not able to accurately approximate the nonlinear relationships of complex topology that exist between design parameters and technological complexity. In addition, the completeness and representativeness of the set of parameters P entirely depend on the expert's qualifications, which introduces an unavoidable systematic error into the model. These methods do not provide for direct analysis of unstructured and semi-structured data formats, such as engineering graphics (drawings) or CAD system data, which leads to the loss of a significant amount of information [11-12].

These limitations, systematized in Table 1, necessitate the transition to a class of models capable of automatically extracting features from heterogeneous data and approximating functions of arbitrary complexity [13].

Table 1

System limitations of traditional labor intensity assessment methods

Disadvantage	Description	A consequence for assessing labor intensity
The fixed shape of the model	The need for an a priori choice of the type of function (linear, polynomial), linking the parameters and complexity.	Low accuracy in the presence of complex, nonlinear dependencies; risk of overfitting or underfitting the model.
Manual selection of features	The subjective choice of a set of parameters is made by an expert technologist based on his experience.	Loss of information due to an incomplete set of features; dependence of the accuracy of the model on the expert's qualifications.
Working with structured data	Inability to directly analyze raw data such as drawings, 3D models, or textual specifications.	Ignoring a significant amount of information contained in the initial design documentation; the need for time-consuming preliminary data preparation.

To overcome these limitations, an architecture based on the principle of functional decomposition is proposed. This approach involves dividing the overall task of optimizing labor costs into two consecutive subtasks:

- 1) accurate prediction of the complexity of atomic technological operations;
- 2) formation of an optimal sequence of these operations and resource allocation.

The proposed concept is based on the interaction of two key modules: predictive and optimization. The predictive module, implemented on the basis of a multimodal neural network, solves the regression problem by approximating the labor intensity function based on heterogeneous input data (structural, visual). The optimization module, which uses the mathematical apparatus of Reinforcement Learning, solves the management problem by developing an optimal stochastic task allocation policy among performers, taking into account their individual competencies [14].

The main task of the predictive module is to construct a function approximating the dependence of the complexity of a technological operation on the heterogeneous characteristics of the input data. Unlike classical regression models that operate exclusively with structured features, the proposed architecture implements a multimodal approach that allows for comprehensive data analysis of various types: structured tabular data and unstructured visual data (engineering graphics).

The architecture of the module is a pipeline processing of data by several parallel processing branches, each of which is specialized in a specific type of data. The output representations of the data from each branch are combined (concatenated) and fed into a common block to form a final forecast. This multimodal approach marks a conceptual transition from the paradigm of manual feature engineering to the paradigm of automatic representation learning. In traditional methods of analysis, there is a semantic gap between a set of formal, easily measurable product parameters (weight, dimensions) and an abstract, difficult-to-formalize concept of its "technological complexity".

An expert technologist tries to bridge this gap intuitively, based on his experience. The proposed architecture, in particular its convolutional branch, solves this problem systematically. During the learning process, a convolutional neural network independently forms a hierarchical system of features, moving from low-level graphical primitives (lines, arcs) to complex structural elements (holes, edges, chamfers) and their spatial combinations (Fig. 2).

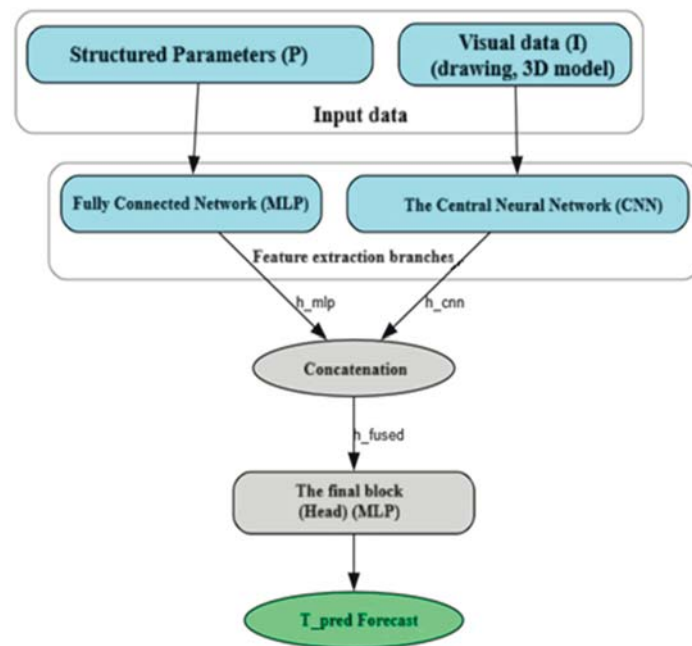


Fig. 2. Data processing pipeline

Mathematically, if the traditional model can be represented as a function described in formula (10), whose argument is a vector of structured parameters, then the proposed model is a function Φ of a data set that includes both a vector P and a tensor I representing visual data (for example, a raster image of a drawing):

$$T_{pred} = \Phi(P, I) \tag{11}$$

This function Φ is implemented by a composition of functions corresponding to the elements of the architecture. The feature vectors extracted by each branch are defined as:

$$\begin{cases} h_{mlp} = \varphi_{mlp}(P; \Theta_{mlp}) \\ h_{cnn} = \varphi_{cnn}(P; \Theta_{cnn}) \end{cases} \quad (12)$$

where φ_{mlp} и φ_{cnn} – nonlinear functions implemented by MLP and CNN networks with sets of trainable parameters Θ_{mlp} и Θ_{cnn} accordingly. The final forecast is formed based on a concatenated feature vector. h_{fused} , obtained by combining vectors from each branch:

$$h_{fused} = h_{mlp} \oplus h_{cnn} \quad (13)$$

where \oplus denotes a concatenation operation. This vector is fed to the input of the final block. φ_{head} :

$$T_{pred} = \varphi_{head}(h_{fused}; \Theta_{head}) \quad (14)$$

The training of the predictive module is carried out within the framework of the Supervised Learning paradigm. A training sample is being formed D , consisting of N object-response pairs:

$$D = \{(X_i, y_i)\}_{i=1}^N \# \quad (15)$$

where $X_i = (P_i, I_i)$ – a multimodal description of the i -th technological operation, and $y_i = T_i$ is the corresponding actual labor intensity value from historical data.

Optimization of model parameters

$$\Theta = \{\Theta_{mlp}, \Theta_{cnn}, \Theta_{head}\} \# \quad (16)$$

It is produced by minimizing the loss function $L(\Theta)$, which uses the root-mean-square error (Mean Squared Error, MSE):

$$L(\Theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi(P_i, I_i) - T_i)^2 \quad (17)$$

Minimization is carried out iteratively using stochastic gradient descent methods, for example, the Adam algorithm.

The optimization module solves the management problem, the purpose of which is to form an optimal work plan to minimize the final labor costs of the project. The task of forming such a plan is formalized in the form of the Markov Decision Process (MDP), which uses Reinforcement Learning (RL) to solve it. In this formulation, the "virtual agent" is trained to make consistent decisions on assigning performers to tasks [14, 15].

Markov's decision-making process (MDP) defined by a tuple (S, A, P, R, γ) where, respectively: S is the state space, A is the action space, P is the state transition function, R is the reward function, γ is the discount factor.

For each engineer e_j , a competence vector C_j is introduced, characterizing his level of mastery of K key skills:

$$C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jK}] \# \quad (18)$$

This vector is used to parameterize the reward function. The reward function is defined as the negative value of the predicted labor intensity obtained from the predictive module, which takes into account both the parameters of the task and the competence of the performer:

$$R(s_t, a_t) = -\Phi(P_k, I_k, C_j) \# \quad (19)$$

where (P_k, I_k) – multimodal task description j_k ; Φ – neural network function from the predictive module.

The agent receives a higher reward for appointing a more competent employee, since the predicted labor intensity (negative remuneration) will be lower (Fig. 3) [16].

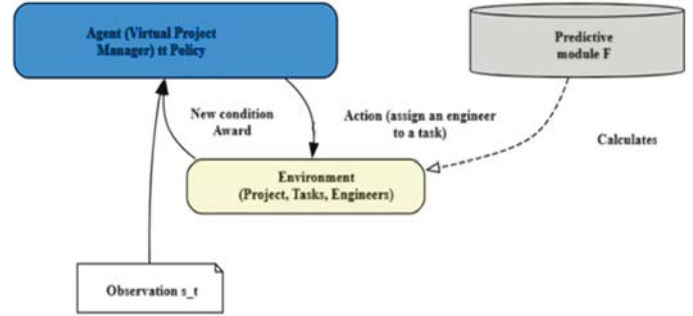


Fig. 3. Interaction of the RL agent with the environment

The purpose of the RL agent is to find the optimal policy. $\pi^*(a | s)$, which assigns to each states an action a that maximizes the expected discounted amount of future rewards (return) G_t :

$$G_t = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i R_{t+i+1} \quad (20)$$

Optimal policy π^* is in the process of iterative interaction of the agent with the environment using algorithms such as Q-learning or its neural network analogues (Deep Q-Networks, DQN). As a result of the work of a trained agent, for a given initial state (the full pool of project tasks), a sequence of actions is generated that represents the optimal work allocation plan that minimizes the total projected labor costs.

Conclusion

In this paper, a study was conducted and a solution was proposed to one of the most pressing tasks of modern mechanical engineering – increasing the reliability of labor intensity estimates at the early stages of design and technological preparation of production. The analysis showed that traditional approaches based on generalized calculations based on analogues demonstrate their inconsistency in conditions of high uncertainty typical for reverse engineering and small-scale production projects. Their fundamental limitations, which consist in the a priori defined structure of the mathematical model, dependence on the subjective experience of an expert and inability to analyze primary design information, lead to significant errors in planning and, as a result, to economic costs.

As an alternative, a neural network architecture is proposed, the methodological apparatus of which forms the core of this article. The presented model is not just an improved forecasting tool,

but represents a conceptual shift in the approach to labor management itself. The key scientific result is the development and formalization of a multimodal predictive module. For the first time, a mechanism has been proposed that allows for joint, synchronous analysis of heterogeneous data – structured tabular parameters and unstructured visual data (engineering graphics). This approach allows us to move from indirect and often incomplete features (weight, dimensions) to a direct, objective analysis of the main labor-intensive factor – the complexity of the geometry of the product, extracting the relevant features automatically, without human intervention.

The second significant element of the novelty is the integration of the predictive module with the optimization module, which operates on the basis of Reinforcement Learning. This combination provides a transition from solving the passive regression problem (answering the question "how long will it take?") to solving the active management problem (answering the question "how to organize work to minimize time?"). The developed model does not just provide a forecast, but generates an optimal policy for distributing project tasks among performers, taking into account their individual competencies. This marks the transition from static rationing to dynamic, adaptive resource management in real time.

The proposed architecture lays the theoretical foundation for the creation of intelligent decision support systems of a new generation. The practical significance of this approach lies in the potential to significantly reduce the risks and costs of implementing import substitution projects, improve budgeting accuracy, and ensure more efficient use of human resources in design and technology services. In a broader perspective, such systems are a necessary step towards realizing the concept of a "Digital Twin" not only for the product, but also for the entire process of its development and technological preparation.

It should be noted that this work is primarily theoretical and methodological in nature. Further research should be aimed at practical verification and development of the proposed ideas. The primary task is the industrial testing of architecture on real datasets of machine-building enterprises in order to quantify the accuracy of forecasting and optimization efficiency. Subsequent scientific research can focus on expanding the functionality of the model, in particular, on detailing the forecast to the level of individual technological operations, as well as on exploring methods for integrating this system into the existing IT landscape of an enterprise (ERP, PDM, PLM systems).

Appreciation

This article has been prepared as part of a research project funded by the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of scientific, methodological and practical foundations of reverse engineering for solving complex import substitution problems in the agro-industrial complex of the Russian Federation" (code of scientific topic FZNW-2024-0026).

References

- [1] E. A. Yakovleva Elena Anatolevna, I. A. Tolochko, A. A. Kim, A. A. Chernyaeva, "Digital Transformation of the Planning System Based on a Digital Twin," *Creative Economy*, 2021, no.15(7), pp. 2811-2826.
- [2] T. S. Sakhapova, T. Sh. Ismagilov, V. A. Tikhonov, "The Production Digital Twin as a Stage of a New Digital Business Model for an Industrial Enterprism" *Mining Industry Journal*, 2023, no. (2), pp. 62-68.
- [3] N. V. Kurganova, M. A. Filin, D. S. Chernyaev, A. G. Shaklein, and D. E. Namiot, "The Implementation of Digital Twins as a Key Area of Production Digitalization," *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, no. 7(5), pp. 105-115.
- [4] D. S. Kokorev, A. A. Yurin, "Digital Twins: Concept, Types and Business Benefits," *Colloquium-Journal*, 2019, 10-34, pp. 31-35.
- [5] V. V. Vikhman, M. V. Romm, "Digital Twins" in Education: Prospects and Reality," *Higher Education in Russia*, 2021, no. (2), pp. 22-32.
- [6] A. V. Petrov Alexander, "Simulation as the Basis of Digital Twin Technology," *IPolytech Journal*, 2018, no. 22 (10-141), pp. 56-66.
- [7] O. A. Ryabinina, A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev, D. Yu. Levin, "Application of 3D Scanning Technology for Creating Digital Twins of Machine Tools," *Vestnik of Voronezh State Technical University*, 2024, no. 20(2), pp. 199-206.
- [8] V. I. Abramov, A. A. Tuitsyna, "Digital Twins – Effective Tools for a Company's Digital Transformation," *[Collection of Articles]*, 2021, pp. 33-39. St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Retrieved August 18, 2025, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47168850>
- [9] Digital Twins and Digital Transformation of Defense Industry Enterprises. (n.d.). Retrieved August 18, 2025, from https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04_april/15/elibrary_37180048_50837228.pdf
- [10] V. I. Abramov, V. D. Andreev, "Comparative Analysis of Digital Twins of Regions," *Information Society*, 2023, no. (4), pp. 106-117.
- [11] K. A. Barilo, "Production Organization and Enterprise Management in the AI Era," *Initiatives of the Youth for Science and Production: Proceedings of the VI All-Russian Scientific-Practical Conference of Young Scientists and Students*, 2023, pp. 96-99. Penza State Agrarian University.
- [12] A. V. Sapunov, T. A. Sapunova, "The Relevance of Implementing Artificial Intelligence in Production Management at an Enterprise," *Economics and Business: Theory and Practice*, 2022, no. 5-3(87), pp. 47-50. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2022-5-3-47-50>
- [13] S. Y. Dementev, "Artificial Intelligence in the Manufacturing Arena: Innovations, Challenges and Prospects," *International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*, 2024, no. 9(1-39), pp. 9-13.
- [14] L. A. Gladkov, N. V. Gladkova, S. A. Gromov, "A Hybrid Model for Solving Operational Production Planning Tasks," *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 4(198), pp. 99-110. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-4-99-110>
- [15] Yu. V. Zakharova, M. Yu. Sakhno, "A Genetic Algorithm for Scheduling on a Multi-Core Processor Considering Task Interference," *Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies: Proceedings of the XXIV International Conference*, 2024, pp. 56-58. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod.
- [16] S. A. Shumsky, O. A. Baskov, *Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2021660307 Russian Federation. Software Agent for Deep Hierarchical Reinforcement Learning ADAM Deep Control (No. 2021619423)*, Moscow Institute of Physics and Technology. 2021.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРУДОЗАТРАТ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Макаров Владимир Сергеевич, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия, makvl2010@gmail.com

Терентьев Алексей Вячеславович, Государственный университет управления, Москва, Россия, av_terentev@guu.ru

Акиншин Никита Сергеевич, Государственный университет управления, Москва, Россия, ns_akinshin@guu.ru

Юдин Денис Александрович, Государственный университет управления, Россия, Москва, da_yudin@guu.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрены современные методы автоматизации и оптимизации производственных процессов при импортозамещении деталей машин сельскохозяйственной техники. Разработан алгоритм на основе искусственного интеллекта, позволяющий оценить трудозатраты в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, автомобилестроение и тракторостроение. Проведен анализ факторов, влияющих на сложность и трудоемкость работы. Особое внимание уделяется оптимизации трудозатрат для сокращения времени выпуска машиностроительных изделий, позволяющих повысить качество и эффективность производства отечественных аналогов деталей машин, улучшает точность планирования ресурсов и сроков на этапах разработки и проектирования.

Ключевые слова: ИИ, machine parts, data processing methods, оптимизация производственных процессов

Литература

1. Яковлева Е.А., Толочко И.А., Ким А.А., Черняева А.А. Цифровая трансформация системы планирования на основе цифрового двойника // Креативная Экономика. Т. 15, вып. 7. С. 2811-2826, 2021.
2. Сахарова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия // Горная Промышленность, вып. 2. С. 62-68, 2023.
3. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // Int. J. Open Inf. Technol. Т. 7, вып. 5. С. 105-115, 2019.
4. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloq.-J. Вып. 10 (34). С. 31-35, 2019.
5. Вихман В.В., Ромм М.В. "Цифровые двойники" в образовании: перспективы и реальность // Высшее Образование в России, вып. 2. С. 22-32, 2021.
6. Петров А.В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // IPolytech J. Т. 22, вып. 10 (141). С. 56-66, 2018.
7. Рябинина О.А., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Левин Д.Ю. "Применение технологии трехмерного сканирования для создания цифровых двойников станочного оборудования // Вестник Воронежского Государственного Технического Университета. Т. 20, вып. 2. С. 199-206, 2024.
8. Абрамов В.И., Туйцына А.А. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. С. 33-39. Просмотрено: 18 август 2025 г. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47168850>
9. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК. Просмотрено: 18 август 2025 г. [Онлайн]. Доступно на: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/04_april/15/elibrary_37180048_50837228.pdf
10. Абрамов В.И., Андреев В.Д. Сравнительный анализ цифровых двойников регионов // Информационное Общество, вып. 4. С. 106-117, авг. 2023.
11. Барило К.А. Организация производства и управление предприятием в эпоху ИИ // Инициативы молодых - науке и производству : Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29-30 ноября 2023 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 96-99. EDN KBCYKQ.
12. Сапунов А.В., Сапунова Т.А. Актуальность внедрения искусственного интеллекта в управлении производством на предприятии // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 5-3(87). С. 47-50. DOI 10.24412/2411-0450-2022-5-3-47-50. EDN CPFEDK.
13. Dementev S.Y. Artificial intelligence in the manufacturing arena: innovations, challenges and prospects // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Vol. 9, No. 1(39), pp. 9-13. EDN USCXIO.
14. Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Громов С.А. Гибридная модель решения задач оперативного производственного планирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 4(198). С. 99-110. DOI 10.23683/2311-3103-2018-4-99-110. EDN PNMAXL.
15. Захарова Ю.В., Сахно М.Ю. Генетический алгоритм для построения расписания на многоядерном процессоре с учетом взаимного влияния работ // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии : Труды XXIV Международной конференции, Нижний Новгород, 18-21 ноября 2024 года. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2024. С. 56-58. EDN KLDUE.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660307 Российская Федерация. Программный Агент глубокого иерархического обучения с подкреплением ADAM Deep Control : № 2021619423 : заявл. 17.06.2021 : опубл. 24.06.2021 / С. А. Шумский, О. А. Басков ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский физико-технический институт". EDN DBDMSF.

Информация об авторах:

Макаров Владимир Сергеевич, д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
Терентьев Алексей Вячеславович, д.т.н., профессор, профессор кафедры управления транспортными комплексами, Государственный университет управления, Москва, Россия

Акиншин Никита Сергеевич, аспирант, специалист Центра управления инжиниринговыми проектами, Государственный университет управления, Москва, Россия

Юдин Денис Александрович, аспирант, специалист Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Россия, Москва

APPROACHES TO OPTIMIZING THE LIFE CYCLE ARCTIC TRANSPORT EQUIPMENT

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-58-65

Maria Yu. Karelina,
State University of Management, Moscow, Russia, myu_karelina@guu.ru

Roman V. Klyuev,
State University of Management, Moscow, Russia, rv_klyuev@guu.ru

Alexey V. Terentyev,
State University of Management, Moscow, Russia, av_terentev@guu.ru

Vladimir D. Kutkov,
State University of Management, Moscow, Russia, vd_kutkov@guu.ru

Nikita S. Akinshin,
State University of Management, Moscow, Russia, ns_akinshin@guu.ru

Denis V. Serdechnyy,
State University of Management, Moscow, Russia, dv_serdechnyy@guu.ru

Manuscript received 08 August 2025;

Accepted 10 October 2025

This article was prepared based on the results of research carried out with funds from the federal budget under the state assignment "Scientific, methodological, and practical foundations for the development and application of digital and intelligent technologies to ensure the sustainable development of the regions of the Russian Federation, including remote and hard-to-reach territories of Siberia, the Far East, and the Arctic zone"; the scientific theme code assigned by the founder is FZNV-2025-0021.

Keywords: Arctic transport equipment, risks, equipment life cycle, cost of mission failure (CMF), service life optimization, risk management, sustainable development of the Arctic

Operating transport equipment in the Arctic is associated with high risks due to the increased likelihood of technical failures under extreme conditions. Fuel and lubricant spills, pollutant emissions during accidents, and the need for emergency rescue operations have a significant negative impact on fragile Arctic ecosystems [1-5]. To minimize damage, an economic and technical model for determining the optimal service life of vehicles has been developed. The model is based on minimizing total costs, including maintenance costs and the expected cost of mission failure (CMF), which aggregates, among other things, potential costs. Equipment reliability degradation is described by an S-shaped function. The methodology has been tested using data from domestic and foreign models of Arctic equipment. Calculations have revealed optimal replacement periods of 6 years for domestic equipment and 10-11 years for foreign equipment. It has been established that the key driver for write-offs is not rising maintenance costs, but rather the exponential growth of risks. The model allows for the justification of a fleet renewal strategy aimed at reducing the frequency of incidents with negative consequences and can be expanded to assess the environmental footprint of equipment lifecycles.

Information about authors:

Maria Yu. Karelina, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Vice-rector, State University of Management, Moscow, Russia

Roman V. Klyuev, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, State University of Management, Moscow, Russia

Alexey V. Terentyev, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, State University of Management, Moscow, Russia

Vladimir D. Kutkov, PhD student, State University of Management, Moscow, Russia

Nikita S. Akinshin, PhD student, State University of Management, Moscow, Russia

Denis V. Serdechnyy, PhD., Senior Researcher, Head of the Laboratory digital and intelligent technologies for the development of the territories of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, Russia

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Ключев Р.В., Терентьев А.В., Кутков В.Д., Акиншин Н.С., Сердечный Д.В. Подходы к оптимизации жизненного цикла арктической транспортной техники // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №11. С. 58-65.

For citation:

M.Yu. Karelina, R.V. Klyuev, A.V. Terentyev, V.D. Kutkov, N.S. Akinshin, D.V. Serdechnyy, "Approaches to optimizing the life cycle of arctic transport equipment," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 11, pp. 58-65.

Introduction

The development of the Arctic region, which boasts significant natural resource reserves and important transportation potential, requires the creation and maintenance of specialized transportation infrastructure [1-8]. Extreme climatic conditions, including extremely low temperatures, storm winds, and challenging ice conditions, place critical stress on equipment [9, 10]. Given the fragile Arctic ecosystem, the consequences of technical failures and accidents are particularly significant, as they can lead to large-scale pollution, disruption of soil and vegetation cover, and negative impacts on biodiversity [11].

The efficiency of transportation and logistics operations in the Arctic is determined not only by the balance between capital (CAPEX) and operating (OPEX) costs but also by taking into account other risks [12]. The cost of equipment failure in such conditions includes not only direct repair costs but also complex system costs, combined into the cost of mission failure (CMF). The CMF structure includes potential losses associated with downtime of production facilities, the costs of eliminating the consequences of emergency situations, including environmental damage, and penalties for failure to fulfill environmental and contractual obligations. These costs can be many times greater than the book value of the transport unit itself, highlighting the need to develop reliable and environmentally oriented approaches to managing transport infrastructure in the Arctic.

An analysis of modern approaches to industrial fleet management shows that prevailing lifecycle cost (LCC) models use linear or overly simplified equipment degradation and depreciation functions [13]. Such models do not correctly account for the stochastic nature of failures and the nonlinear growth of operational risks, including environmental ones, typical of work in extreme environmental conditions. In particular, they ignore the potential for a sharp increase in the frequency of incidents that can lead to significant consequences, such as oil spills, soil disturbance, and damage to biodiversity [14]. Thus, a significant scientific and methodological gap is emerging in the development of integrated approaches that enable the quantitative assessment and optimization of fleet renewal schedules, directly considering not only the economic but also the environmental consequences of failures. A pressing challenge is the creation of a methodology that integrates probabilistic reliability models, environmental risk assessments, and economic calculations, thereby minimizing the cumulative impact of industrial activity on Arctic ecosystems [15].

To address these environmental and economic challenges, this study developed a comprehensive economic and technical model aimed at determining the safe operating period of vehicles in Arctic conditions [16]. The model is based on minimizing the objective function of total annual costs, which includes both deterministic maintenance costs and the expected value of mission failures. This approach enables the integration of time-varying technical reliability parameters with long-term performance indicators of the industrial fleet. The aim of this study is to develop and test a mathematical model for determining the optimal service life of Arctic transport equipment from a risk-minimizing perspective. The model takes into account the nonlinear dynamics of the growth probability of failure depending on the age of the equipment and stochastic environmental factors, and also enables a comparative analysis of various fleet lifecycle management strategies.

The scientific novelty of this study lies in the integration of an environmental component into the cost of mission failure (CMF) indicator as a key element of the objective function for optimizing the Arctic fleet. The developed model is a strategic planning tool that allows for the justification of a renewal schedule for a heterogeneous fleet of vehicles based on minimizing cumulative risks and economic costs throughout the entire lifecycle, thereby reducing the negative impact of industrial activity on fragile Arctic ecosystems.

Materials & Methods

The study is based on the method of economic-technical modeling of the vehicle lifecycle. This method allows for a dynamic assessment of the total cost of ownership of an equipment fleet by integrating deterministic operational costs and stochastic risks associated with failures. The modeling is conducted for a heterogeneous fleet that includes both domestic and foreign models of motor transport equipment adapted for operation in Arctic conditions.

The initial data for the modeling are the technical-operational and cost parameters of four representative equipment models. These parameters, presented in Table 1, include the initial cost, the basic annual maintenance cost for new equipment, the baseline probability of failure per typical mission, and the aggregated Cost of Mission Failure (CMF).

Table 1

Initial Parameters of Arctic Transport Equipment Models

Model	Origin	Class	Initial Cost, RUB	Base Maintenance Cost, RUB/year	Base Failure Probability	Cost of Mission Failure (CMF), RUB
KAMAZ-6355 "Arktika"	Domestic	Truck	15,000,000	800,000	0.05	50,000,000
TREKOL-39294	Domestic	All-Terrain Vehicle	7,000,000	450,000	0.08	30,000,000
BvS10 "Beowulf"	Foreign	All-Terrain Vehicle	45,000,000	1,200,000	0.02	40,000,000
Foremost Commander C	Foreign	Truck	60,000,000	1,800,000	0.03	70,000,000

The central element of the model is the formalization of the equipment degradation process over time. The annual maintenance costs, $C_{maint}(t)$, for equipment of age t years are modeled using linear growth, reflecting the planned increase in the volume and complexity of repair work [17]:

$$C_{maint}(t) = C_{maint_base} \cdot (1 + r_m \cdot (t - 1)) \tag{1}$$

where: C_{maint_base} – is the base annual maintenance cost; r_m – is the annual growth rate of maintenance cost; t – is the year of operation.

The annual failure probability of the equipment, $P_{failure}(t)$, is modeled using an S-shaped (sigmoid) function. This approach allows for a more realistic representation of the three lifecycle phases: an initial "run-in" period with slow risk growth, a period of normal operation with accelerating growth, and a final "wear-out" period where the failure probability approaches its maximum value:

$$P_{failure}(t) = P_{failure_{base}} + (P_{max} - P_{failure_{base}}) \cdot \frac{1}{1+e^{-k(t-t_0)}} \quad (2)$$

where: $P_{failure_{base}}$ – is the base annual failure probability; P_{max} – is the maximum theoretical failure probability; t_0 – is the inflection point of the curve (average service life); k – is the coefficient determining the steepness of the growth.

Based on these dynamic parameters, the objective function is formed – the total annual costs $C_{total}(t)$, consisting of maintenance costs and the expected value of the cost of mission failures $E[CMF(t)]$:

$$C_{total}(t) = C_{maint}(t) + E[CMF(t)] \quad (3)$$

here the expected value is calculated as:

$$E[CMF(t)] = P_{failure}(t) \cdot CMF_{base} \cdot N_{missions} \quad (4)$$

where: CMF_{base} – is the base cost of a single mission failure; $N_{missions}$ – is the average annual number of missions.

The criterion for determining the optimal service life T^* is the minimization of the average total cost of ownership over the entire operational period. This metric, $C_{avg_{total}}(T)$, accounts for both the initial capital expenditure $C_{initial}$ and the sum of all operational costs

$$C_{avg_{total}}(T) = \frac{1}{T} \left(C_{initial} + \sum_{t=1}^T C_{operational}(t) \right) \quad (5)$$

The optimal service life T^* corresponds to the year in which this function reaches its minimum:

$$T^* = \arg \min_T \{ C_{avg_{cumulative}}(T) \} \quad (6)$$

Within the computational experiment, the following unified parameters were adopted for all models:

Simulation parameters

Table 2

Parameter	Notation	Value	Note
Maximum modeling period	T_{max}	25 years	Planning horizon for the equipment lifecycle.
Maintenance cost growth rate	r_m	0.10	Reflects the linear annual increase in maintenance cost.
Failure severity factor	S_f	0.3	Share of CMF lost in an average failure.
Max. failure probability	P_{max}	0.85	Asymptotic limit for the S-shaped curve.
Parameters S-curve (t 0, k)			
For domestic equipment	t_0, k	9 years, 0.4	Inflection point and growth steepness of the curve.
For foreign equipment	t_0, k	12 years, 0.35	Inflection point and growth steepness of the curve.

The modeling process itself can be represented in a simplified form by the following diagram (Fig. 1). The software implementation of the modeling was carried out using Jupyter Notebook [18].

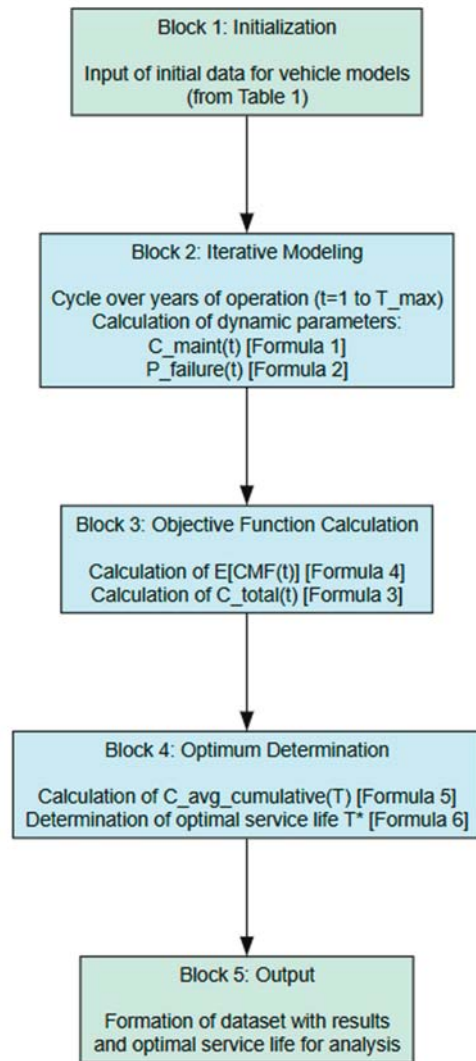


Fig. 1. Simplified diagram of the modeling process

Results

The application of the described methodology to the initial data allowed for the quantitative assessment of the dynamics of operational costs and the determination of economically optimal service lives for each of the equipment models under consideration. The modeling results are presented as a series of graphs illustrating key dependencies.

An initial analysis of the input data reveals fundamental differences in the economic structure and technical risks between domestic and foreign models. Figure 2 presents an integrated analysis comparing the cost indicators and baseline reliability of the equipment.

The upper sub-plot (A) is a grouped bar chart comparing the initial cost and the Cost of Mission Failure (CMF) for each model. Annotations above the CMF bars show the risk multiplier – the ratio of CMF to the initial cost. The lower sub-plot (B) is a bar chart illustrating the baseline failure probability permission for each model, with precise percentage values indicated.

The upper graph (Fig. 2, A) demonstrates that for domestic models, the cost of mission failure exceeds their initial cost by a factor of 3.3-4.3. For foreign analogues, this ratio is less than 1.0.

The lower graph (Fig. 2, B) shows that the baseline failure probability for domestic models (5% and 8%) is 2-4 times higher than for foreign ones (2% and 3%).

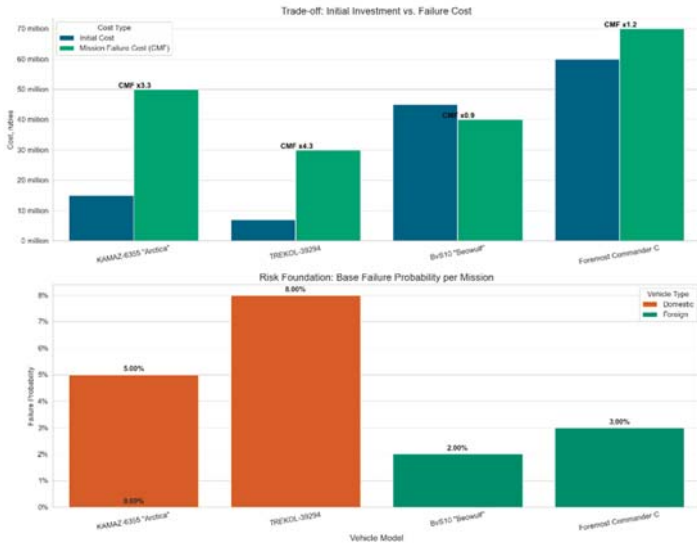


Fig. 2. Integrated comparative analysis of economic and technical parameters of Arctic equipment

Dynamic modeling of the equipment lifecycle over a 20-year operational period allowed for the calculation of the change in total annual costs, including maintenance expenses and the expected value of losses from failures. The dynamics of these costs are presented in Figure 3.

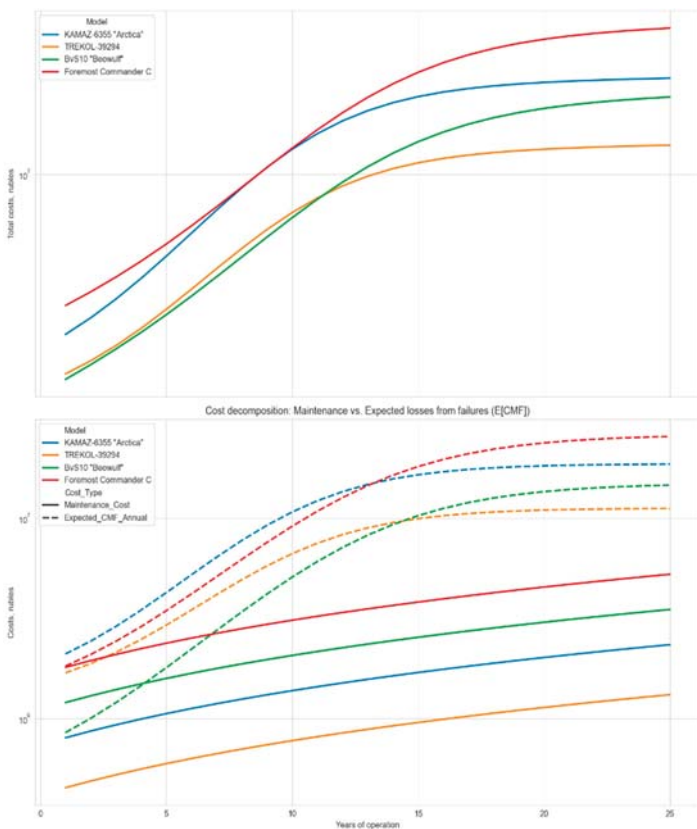


Fig. 3. Dynamics of total annual costs over the lifecycle and cost decomposition

The graph of the dynamics of total annual costs consists of line charts showing the change in total annual costs (on a logarithmic scale) for the four equipment models as a function of the year of operation. Each line corresponds to one model.

The analysis of the graph in Figure 3 shows that all models are characterized by a non-linear, near-exponential growth of total costs after a certain period of operation. The most intensive growth is observed for the "TREKOL-39294" and "KAMAZ-6355 'Arktika'" models.

To identify the factors driving this growth, a decomposition of the total costs into two components was performed: deterministic maintenance costs and probabilistic costs associated with failure risks (E[CMF]).

The decomposition graph consists of line charts where, for each model, two curves are shown: one (solid) reflects the growth of maintenance costs, and the second (dashed) shows the growth of the expected value of the cost of mission failures (E[CMF]). The vertical axis is presented on a logarithmic scale.

The figure indicates that in the initial stages of the lifecycle (1-5 years), maintenance costs are the main contributor to total costs. However, after 5-7 years of operation, an intersection point is observed for all models, after which the expected value of losses from failures begins to dominate the cost of maintenance, becoming the determining factor in the growth of total costs.

Based on the calculated total annual costs, the optimal service life for each model was determined by minimizing the average total cost of ownership over the period. The dynamics of this indicator and the optimum points for each model are presented in Figure 4.

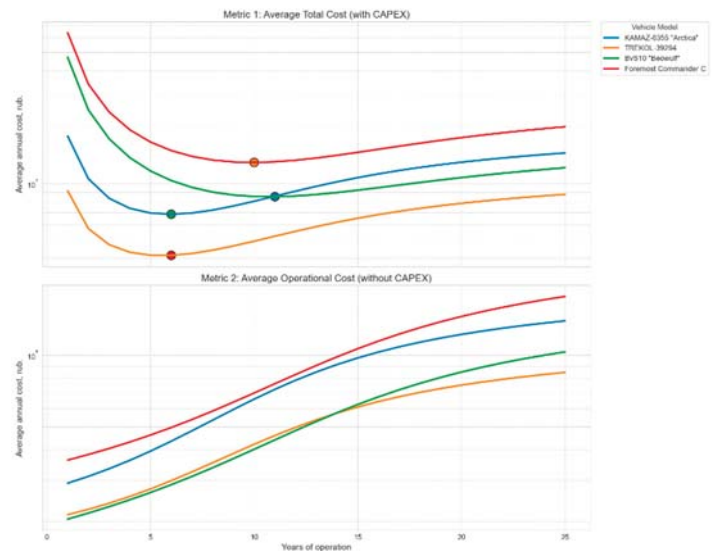


Fig. 4. Determination of the optimal service life

The graph consists of line charts showing the change in the average annual cost of ownership over the entire operational period for each model. Points on the curves mark the minimums, corresponding to the economically optimal year for equipment replacement.

The calculations show that the average total cost curves have a distinct U-shape. The minimum points of these curves, which determine the optimal service life, are summarized in Table 3.

Table 3

Results of Optimal Service Life Calculation

Model	Origin	Optimal Replacement Year
KAMAZ-6355 "Arktika"	Domestic	6
TREKOL-39294	Domestic	6
BvS10 "Beowulf"	Foreign	11
Foremost Commander C	Foreign	10

The results presented in Table 3 show that the economically justified operational period for domestic models is 6 years, whereas for their foreign analogues, this period reaches 10-11 years.

Discussion

The obtained results demonstrate that an environmentally-oriented model of the equipment lifecycle in extreme Arctic conditions is fundamentally determined by the dynamics of operational risks, including environmental ones, rather than solely by deterministic maintenance costs. The use of an S-shaped aging function, in contrast to simplified linear or exponential models, allows for a more accurate assessment of the equipment degradation process, taking into account its impact on the environment [19]. The introduction of the inflection point parameter (t_0) makes it possible to quantitatively determine the critical moment after which the accelerated growth in failure probability renders further operation of the equipment environmentally and economically impractical due to a disproportionate increase in the expected value of the cost of mission failure ($E[CMF]$), which includes potential environmental damage.

This approach allows for the identification of the point at which the risks of emergency situations with significant environmental consequences—such as fuel spills, pollutant emissions, and damage to fragile Arctic ecosystems—begin to increase exponentially. Thus, the model provides a scientifically substantiated criterion for making decisions about decommissioning equipment before the onset of a period of heightened environmental risks, which contributes to minimizing the anthropogenic impact on the environment of the Arctic region [20].

The analysis of the results shows that it is the $E[CMF]$, not the maintenance cost, that drives the growth of total costs in the middle and late stages of the lifecycle. This fact confirms that strategic decisions about fleet renewal in the Arctic should be based primarily on risk management. The optimal replacement time occurs not when the equipment is physically worn out, but when the average cost of ownership, which includes the amortized risk, reaches its minimum [21]. Continuing operation beyond this point means that each subsequent year of ownership becomes less economically advantageous.

A comparative analysis of domestic and foreign models reveals not a qualitative superiority, but a fundamental difference in optimal management strategies. The high initial cost of foreign equipment can be interpreted as a capital investment in extending the operational period with an acceptable level of risk, which is reflected in a later inflection point ($t_0 = 11$ years) of the S-shaped curve. The optimal service life of 10-13 years for these models corresponds to a strategy of long-term asset ownership [21].

For domestic equipment, characterized by lower initial investments but also an earlier onset of the accelerated wear-out phase ($t_0 = 9$ years), the model prescribes a different strategy. The optimal service life of 7-9 years indicates the advisability of a shorter fleet renewal cycle. This approach allows for maintaining the average age and, consequently, the average risk level of the entire fleet at an economically acceptable level, managing risks not through the durability of an individual unit, but through operational flexibility and renewal frequency [22].

The proposed methodology has the potential for expansion to heterogeneous fleets that include unmanned systems. For such systems, both the cost structure (elimination of crew costs, changes in the structure of maintenance costs) and the reliability function parameters (new types of failures related to electronics and communication channels) will change. The flexibility of the model allows for the integration of these changes and for conducting a comparative analysis to determine the optimal balance between manned and unmanned platforms for specific transport tasks in the Arctic [23, 24].

It should be acknowledged that the accuracy of the modeling depends on the quality of the input expert parameters (t_0 , k , S_f). Further development of this research involves the collection and statistical analysis of real operational data on failures of Arctic equipment. This will allow for the verification and calibration of the model parameters, increasing its predictive accuracy and transforming it from a strategic tool into a tactical decision support system.

Conclusion

A model has been developed that provides a quantitative tool for strategic service life planning of Arctic transport equipment. It takes into account not only economic factors but also, indirectly, environmental factors through the cost of mission failure (CMF). It has been established that the optimal service life of domestic equipment (6 years) is significantly shorter than that of foreign equivalents (10-11 years), indicating the need for different fleet management strategies. It has been revealed that the key factor determining the need for equipment replacement is the nonlinear growth of operational risks (the probability of failure), rather than direct maintenance costs. A new approach has been proposed that enables a transition from reactive management (repair after failure) to proactive strategic fleet renewal planning, which provides the basis for reducing damage and increasing the resilience of transport operations in fragile Arctic ecosystems. The model has been found to be flexible and can be adapted to the effectiveness of various fleet management strategies, for example, by incorporating specific costs for eliminating environmental damage into the CMF.

Acknowledgments

This article was prepared based on the results of research carried out with funds from the federal budget under the state assignment "Scientific, methodological, and practical foundations for the development and application of digital and intelligent technologies to ensure the sustainable development of the regions of the Russian Federation, including remote and hard-to-reach territories of Siberia, the Far East, and the Arctic zone"; the scientific theme code assigned by the founder is FZNW-2025-0021.

References

- [1] M. Yu. Karelina, M. S. Chekusov, D. V. Serdechnyy et al., "Evaluation of the operating efficiency of the agricultural machinery fleet of a modern enterprise of the agro-industrial complex," *Management*. 2025. Vol. 13, No. 3, pp. 36-51. DOI 10.26425/2309-3633-2025-13-3-36-51.
- [2] M. Yu. Karelina, D. V. Serdechnyy, A. Yu. Melekhovets et al., "Approaches to the development of adapted agricultural machinery for hard-to-reach areas of Russia," *Bulletin of the Dagestan State Agrarian University*. 2025. No. 3 (27), pp. 153-158. DOI 10.52671/26867591_2025_3_153.
- [3] Yu. N. Serdechnaya, D. V. Serdechnyy, S. A. Korchagin, N. A. Andrianov, "Development of an effective system for monitoring and analyzing modern technologies for the development of the agro-industrial complex in mountainous territories," *Sustainable development of mountainous territories*. 2024. Vol. 16. No. 2 (60), pp. 770-779.
- [4] E. N. Bykovskaya, Yu. N. Kafiyatullina, G. P. Kharchilava, "Risks of innovative development of corporations in the era of the digital revolution," *Society. Trust. Risks: Trust in migration processes. Risks of the New Society: Proceedings of the International Forum*, Moscow, October 02, 2019 / Under the general editorship of P.V. Terelyansky. Vol. Issue 2. Moscow: State University of Management, 2019, pp. 118-120.
- [5] M. K. Reynolds, D. A. Walker, K. J. Ambrosius, J. Brown, K. R., M. Everett Kanevskiy, G. P. Kofinas, V. E. Romanovsky, Y. Shur, P. J. Webber, "Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska," *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, № 4, pp. 1211-1224. DOI: 10.1111/gcb.12500.
- [6] O. V. Voronkova, "Macroeconomic Issues of Support for Manufacturers of All-Terrain Vehicles in the Arctic," *Components of Scientific and Technological Progress*. 2022. No. 10(76), pp. 34-36.
- [7] V. F. Kushlyayev, S. E. Stepanov, K. S. Popov, "Off-road vehicles for the Arctic zone of the Russian Federation," *Fire safety: modern challenges. Problems and solutions: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, April 22, 2021 / Comp.: A.V. Zykov, N.V. Fedorova, O.E. Evseeva. Saint Petersburg: Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, 2021, pp. 237-244.
- [8] V. F. Kushlyayev, A. A. Agranovsky, D. V. Kushlyayev, "Transport and technological machines for the conditions of the Arctic zone of the Russian Federation," *Emergency situations: prevention and elimination*. 2021, no. 2(50), pp. 139-163.
- [9] S. V. Belokopytov, N. Y. Derevskov, "Analysis of the readiness of automotive engines for operation in the Arctic region," *Modern School of Russia. Modernization issues*. 2022, no. 2-1(39), pp. 142-144.
- [10] V. G. Shekhovtsova, A. P. Zhigadlo, "Transport and technological facilities for the development of the Arctic and the specifics of their operation," *Architecture, construction, transport: proceedings of the International Scientific and Practical Conference (on the 85th anniversary of SibADI)*, Omsk, December 02-03, 2015. Omsk: Siberian State Automobile and Road Academy (SibADI), 2015, pp. 949-955.
- [11] N. G. Savelyev, V. V. Pokutny, L. S. Roznovskaya, "A system for ensuring the readiness of military automotive equipment samples for their intended use in the Arctic climate zone," *Military thought*. 2022. No. 2, pp. 104-116.
- [12] A. I. Milova, M. V. Nesnova, "Transport and logistics system of the Russian Arctic," *Modern problems of the innovative economy*. 2021, no. 8, pp. 160-165. DOI 10.52899/978-5-88303-634-6_160.
- [13] O. V. Malikhina, A.V. Terentyev, "Methodology of car operation management in conditions of insufficient information," *Saint Petersburg: Private Scientific and Educational Institution of additional Professional Education National Research Institute for the Humanities "National Development"*, 2025. 132 p. ISBN 978-5-00213-426-7. DOI 10.37539/M241217.2024.53.32.001.
- [14] M. Y. Karelina, A. A. Akulov, M. Sh. M. Magomedov, D. A. Yudin, "Statistical analysis of failures of automotive systems caused by friction," *Transport accessibility of the Arctic: Networks and systems: Proceedings of the III International Conference*, St. Petersburg, June 13-14, 2024. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2025, pp. 121-131.
- [15] A. A. Noskov, A.V. Terentyev, D. D. Sidletskaya, D. A. Tsarev, "Adaptation of the mathematical model of quality management of decisions in truck transportation systems in conditions of uncertainty," *Bulletin of Civil Engineers*. 2024, no. 1(102), pp. 104-111. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-104-111.
- [16] T. N. Zamota, O. N. Zamota, E. V. Turushina, "Methodology for calculating the economic efficiency of car operation when implementing an intelligent maintenance and repair system," *The world of transport and technological machines*. 2024, no. 3-1(86), pp. 123-130. DOI 10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-123-130.
- [17] A. P. Katalevich, A. A. Demyanov, E. M. Anshakov, "Features of the organization of maintenance and repair of vehicles in the Arctic zone of the Russian Federation," *Current issues of promising areas of application of automotive and special equipment: Proceedings of the IV Interdepartmental Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, May 13, 2022 of the year. Saint Petersburg: Mediapapir LLC, 2022, pp. 101-105.
- [18] Certificate of state registration of the computer program No. 2025616031 Russian Federation. Software "Mathematical model for assessing risk expectations in logistics transportation": application 12.03.2025: published 12.03.2025 / N. V. Solovyov, A.V. Terentyev, M. Y. Karelina, R. O. Sudorgin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State University of Management".
- [19] V. F. Kushlyayev, A. T. Guryev, E. A., Demenkova, I. S. Vasendina, "Structural modeling of life cycle processes of transport and technological machines for emergency situations," *Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*, Ivanovo, April 16, 2020. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. 473 p. pp. 222-229. ISBN: 978-5-6042853-4-3.
- [20] I. Makarova, G. Mavlyautdinova, L. Gabsalikhova, V. Mavrin, P. Buyvol, "Improvement of the Transport System Environmental Safety of the Arctic Region," 2024. Doi: 10.1007/978-981-97-0372-2_53.
- [21] V. A. Vasin, V. A. Nevelev, "System analysis of the economic efficiency of managing the life cycle of Russian unmanned vehicles," *Modern problems of managing competitiveness and innovative development of Russia based on digital technologies 12/2018: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference; In memory of Honored Scientist of the Russian Federation VI. Kravtsova*, Moscow, December 11, 2018. Moscow: Moskovsky Polytech, 2019, pp. 163-167.
- [22] R. R. Vazetdinov, M. M. Gilmanov, I. M. Gilmanov, "Economic assessment of competition between Russian KAMAZ trucks and Chinese trucks in the market of vehicles," *Actual problems and prospects of implementation of national projects in the Russian Federation: Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation*, Pavlovo, December 21, 2023 of the year. Pavlovo: N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 2024, pp. 243-247.
- [23] I. N. Suslin, R. N. Khamitov, N. Y. Derevskov, K. E. Gaev, "Features of the operation of military vehicles in the Arctic," *Science and military security*. 2024., no. 1(36), pp. 41-50.
- [24] S. G. Dubinin, V. I. Zakharov, A. Yu. Mingalev, "Features of the operation of military vehicles in the Arctic," *Problems of technical support for troops in modern conditions: Proceedings of the VII Interuniversity scientific and practical conference*, St. Petersburg, March 25, 2022. Saint Petersburg: Military Academy of the Signal Corps, S. M. Budyonny, 2022, pp. 360-368.

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Карелина Мария Юрьевна, Государственный университет управления, Москва, Россия, myu_karelina@guu.ru

Клюев Роман Владимирович, Государственный университет управления, Москва, Россия, rv_kluev@guu.ru

Терентьев Алексей Вячеславович, Государственный университет управления, Москва, Россия, av_terentev@guu.ru

Кутков Владимир Дмитриевич, Государственный университет управления, Москва, Россия, vd_kutkov@guu.ru

Акиншин Никита Сергеевич, Государственный университет управления, Москва, Россия, ns_akinshin@guu.ru

Сердечный Денис Владимирович, Государственный университет управления, Москва, Россия, dv_serdechnyj@guu.ru

Аннотация

Эксплуатация транспортной техники в Арктике сопряжена с высокими рисками, обусловленными повышенной вероятностью технических отказов в экстремальных условиях. Разливы горюче-смазочных материалов, выбросы загрязняющих веществ при авариях и необходимость проведения аварийно-спасательных операций оказывают значительное негативное воздействие на хрупкие арктические экосистемы [1-5]. Для минимизации ущерба разработана экономико-техническая модель определения оптимального срока службы транспортных средств. Модель основана на минимизации совокупных издержек, включающих затраты на техническое обслуживание и математическое ожидание стоимости срыва миссии (Cost of Mission Failure, CMF), которая агрегирует, в том числе, потенциальные издержки. Дegradация надежности техники описана S-образной функцией. Методология апробирована на данных по отечественным и зарубежным моделям арктической техники. Расчеты выявили оптимальные сроки замены: 6 лет для отечественной и 10-11 лет для зарубежной техники. Установлено, что ключевым драйвером для списания является не рост затрат на обслуживание, а экспоненциальный рост рисков. Модель позволяет обосновать стратегию обновления парка, направленную на снижение частоты инцидентов с негативными последствиями, и может быть расширена для оценки экологического следа жизненного цикла техники.

Ключевые слова: арктическая транспортная техника, риски, жизненный цикл оборудования, стоимость срыва миссии (CMF), оптимизация сроков эксплуатации, управление рисками, устойчивое развитие Арктики

Литература

1. Карелина М.Ю., Чекусов М.С., Сердечный Д.В. и др. Оценка эффективности эксплуатации парка сельскохозяйственной техники современного предприятия М.Ю. агропромышленного комплекса // Управление. 2025. Т. 13, № 3. С. 36-51. DOI 10.26425/2309-3633-2025-13-3-36-51.
2. Карелина М.Ю., Сердечный Д.В., Мелеховец А.Ю. и др. Подходы к разработке адаптированной сельскохозяйственной техники для труднодоступных территорий России // Известия Дагестанского ГАУ. 2025. № 3(27). С. 153-158. DOI 10.52671/26867591_2025_3_153.
3. Сердечная Ю.Н., Сердечный Д.В., Корчагин С.А., Андриянов Н.А. Разработка эффективной системы мониторинга и анализа современных технологий развития агропромышленного комплекса в горных территориях // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2 (60). С. 770-779.
4. Быковская Е.Н., Кафиятуллина Ю.Н., Харчилава Г.П. Риски инновационного развития корпораций в эпоху цифровой революции // Общество. Доверие. Риски: Доверие к миграционным процессам. Риски нового общества : Материалы Международного форума, Москва, 02 октября 2019 года / Под общей редакцией П.В. Терелянского. Выпуск 2. М.: Государственный университет управления, 2019. С. 118-120.
5. Reynolds M.K., Walker D.A., Ambrosius K.J., Brown J., Everett K.R., Kanevskiy M., Kofinas G.P., Romanovsky V.E., Shur Y., Webber P.J. Cumulative geoeological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // Global Change Biology. 2014. Vol. 20, № 4. P. 1211-1224. DOI: 10.1111/gcb.12500.
6. Voronkova O.V. Macroeconomic Issues of Support for Manufacturers of All-Terrain Vehicles in the Arctic // Components of Scientific and Technological Progress. 2022. No. 10(76). P. 34-36.
7. Кушляев В.Ф., Степанов С.Э., Попов К.С. Машины повышенной проходимости для Арктической зоны Российской Федерации // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года / Сост.: А.В. Зыков, Н.В. Федорова, О.Е. Евсеева. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2021. С. 237-244.
8. Кушляев В.Ф., Аграновский А.А., Кушляев Д.В. Транспортно-технологические машины для условий арктической зоны Российской Федерации // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2021. № 2(50). С. 139-163.
9. Белокопытов С.В., Деревсков Н.Ю. Анализ готовности двигателей автомобильной техники к эксплуатации в условиях арктического региона // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2022. № 2-1(39). С. 142-144.
10. Шеховцова В.Г., Жигадло А.П. Транспортно-технологические средства для освоения Арктики и особенности их эксплуатации // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ"), Омск, 02-03 декабря 2015 года. Омск: ФГБОУ ВПО "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2015. С. 949-955.

11. Савельев Н.Г., Покутний В.В., Розновская Л.С. Система обеспечения готовности образцов военной автомобильной техники к применению по назначению в арктической климатической зоне // Военная мысль. 2022. № 2. С. 104-116.
12. Милова А.И., Неснова М.В. Транспортно-логистическая система Российской Арктики // Современные проблемы инновационной экономики. 2021. № 8. С. 160-165. DOI 10.52899/978-5-88303-634-6_160.
13. Малихина О.В., Терентьев А.В. Методология управления эксплуатацией автомобилей в условиях недостаточности информации. Санкт-Петербург : Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт "НАЦРАЗВИТИЕ", 2025. 132 с. ISBN 978-5-00213-426-7. DOI 10.37539/M241217.2024.53.32.001.
14. Карелина М.Ю., Акулов А.А., Магомедов М.Ш.М., Юдин Д.А. Статистический анализ отказов автомобильных систем, вызванных трением // Транспортная доступность Арктики: сети и системы : Материалы III Международной конференции, Санкт-Петербург, 13-14 июня 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. С. 121-131.
15. Носков А.А., Терентьев А.В., Сидлецкая Д.Д., Царев Д.А. Адаптация математической модели управления качеством принимаемых решений в системах грузовых автомобильных перевозок в условиях неопределенности // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1(102). С. 104-111. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-104-111.
16. Замота Т.Н., Замота О.Н., Турушина Е.В. Методика расчета экономической эффективности эксплуатации автомобиля при внедрении интеллектуальной системы ТО и р // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3-1(86). С. 123-130. DOI 10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-123-130.
17. Каталевич А.П., Демьянов А.А., Аншаков Е.М. Особенности организации технического обслуживания и ремонта транспортных средств в Арктической зоне Российской Федерации // Актуальные вопросы перспективных направлений применения автомобильной и специальной техники : Сборник научных трудов IV Межведомственной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13 мая 2022 года. Санкт-Петербург: ООО "Медиапапир", 2022. С. 101-105.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616031 Российская Федерация. Программное обеспечение "Математическая модель оценки ожидания рисков при логистических транспортных перевозках" : заявл. 12.03.2025 : опубли. 12.03.2025 / Н. В. Соловьев, А. В. Терентьев, М. Ю. Карелина, Р. О. Судоргин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет управления".
19. Кушляев В.Ф., Гурьев А.Т., Деменкова Е.А., Васендина И.С. Структурное моделирование процессов жизненного цикла транспортно-технологических машин для чрезвычайных ситуаций // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 16 апреля 2020 г. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. 473 с. С. 222-229. ISBN: 978-5-6042853-4-3.
20. Makarova Irina, Mavlyautdinova Gulnaz, Gabsalikhova Larisa, Mavrin Vadim, Polina Buyvol. Improvement of the Transport System Environmental Safety of the Arctic Region. 2024. 10.1007/978-981-97-0372-2_53.
21. Васин В.А., Невелев В.А. Системный анализ экономической эффективности управления жизненным циклом российских беспилотных автомобилей // Современные проблемы управления конкурентоспособностью и инновационным развитием России на основе цифровых технологий 12/2018 : Материалы VII Международной научно-практической конференции; Памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации В.И. Кравцовой, Москва, 11 декабря 2018 года. М.: Московский Политех, 2019. С. 163-167.
22. Вазетдинов Р.Р., Гильманов М.М., Гильманов И.М. Экономическая оценка конкуренции между российскими камазами и китайскими грузовиками на рынке транспортных средств // Актуальные проблемы и перспективы реализации национальных проектов в Российской Федерации : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Павлово, 21 декабря 2023 года. Павлово: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2024. С. 243-247.
23. Суслин И.Н., Хамитов Р.Н., Деревсков Н.Ю., Гаев К.Е. Особенности эксплуатации военной автомобильной техники в Арктике // Наука и военная безопасность. 2024. № 1(36). С. 41-50.
24. Дубинин С.Г., Захаров В.И., Мингалев А.Ю. Особенности эксплуатации военной автомобильной техники в условиях Арктики // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды VII межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 25 марта 2022 года. Санкт-Петербург: ФГКВО УВО "Военная академия связи имени маршала советского союза С.М. Буденного" Министерства обороны Российской Федерации, 2022. С. 360-368.

Информация об авторах:

Карелина Мария Юрьевна, д.т.н., д.п.н., проректор, Государственный университет управления, Москва, Россия

Клюев Роман Владимирович, д.т.н., главный научный сотрудник, Государственный университет управления, Москва, Россия

Терентьев Алексей Вячеславович, д.т.н., главный научный сотрудник, Государственный университет управления, Москва, Россия

Кутков Владимир Дмитриевич, аспирант, Государственный университет управления, Москва, Россия

Акиншин Никита Сергеевич, аспирант, Государственный университет управления, Москва, Россия

Сердечный Денис Владимирович, к.т.н., старший научный сотрудник, начальник Лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления, Москва, Россия