

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 (ПИНЦ)
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

- Нго К.Ф., Бекушев Н.С., Громорушкин В.Н., Варламов О.В.**
Особенности схмотехники непосредственного суммирования ключевых генераторов в передатчиках с дефазированием 4
- Демин Д.Б.**
Исследование характеристик рассеяния в двумерной задаче дифракции на идеально проводящем теле с кусочно-аналитической границей 15
- Варламов В.О.**
Методика определения скорости помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолнии ДКМВ диапазона 23

ТРАНСПОРТ

- Пугачев И.Н., Тормозов В.С., Евтюков С.С., Смокталь Н.Н., Золкин А.Л.**
Многовидовая пространственно-временная свертка для повышения точности прогнозирования транспортных потоков 31
- Клюев Р.В., Косцов А.В., Добаев А.З., Тлехугов А.М., Хабаева К.М.**
Разработка метода автоматизированной обработки характеристик транспортного потока для повышения качества транспортного обслуживания населения городов 38

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

- Егоров Д.А., Балобанов А.В., Строганова Е.П.**
Комплексная оценка характеристик камеры посредством анализа пространственно-частотного отклика 45

ТРАНСПОРТ

- Польянов В.В., Атучин В.В., Бессоненко С.А.**
Стохастические отклонения от графика движения тяжеловесных и длинносоставных поездов 53

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Ngo Q.F., Bekushev N.S., Gromorushkin V.N., Varlamov O.V.**
Outphasing transmitter circuit with switching generators
direct summation design features 4
- Demin D.B.**
Study of scattering characteristics in a two-dimensional
diffraction problem on a perfectly conducting body
with a piecewise analytic boundary 15
- Varlamov V.O.**
Methodology for determining the error correction code rate
of the HF range digital voice radio link 23

TRANSPORT

- Pugachev I.N., Tormozov V.S., Evtjukov S.S.,
Smoktal N.N., Zolkin A.L.**
Multi-view spatial-temporal convolution to improve
the accuracy of traffic flow forecasting 31
- Klyuev R.V., Kostsov A.V., Dobaev A.Z.,
Tlekhugov A.M., Khabaeva K.M.**
The development of a method for automated processing
of traffic flow characteristics in order to improve the quality
of transport services for the urban population 38

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Egorov D.A., Balobanov A.V., Stroganova E.P.**
Complex camera characteristics assessment
through SFR analysis 45

TRANSPORT

- Polyanov V.V., Atuchin V.V., Bessonenko S.A.**
Stochastic timetable disturbances in heavy haul
and extra-long train traffic 53

T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 19. No. 2-2025

Release date: 25.02.2025

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

www.media-publisher.ru

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СУММИРОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПЕРЕДАТЧИКАХ С ДЕФАЗИРОВАНИЕМ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-4-14

Нго Куок Фунг,*Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, quocphung47@gmail.com***Manuscript received** 15 December 2024;**Accepted** 20 January 2025**Бекушев Николай Сергеевич,***Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, mnikolaysk@mail.ru***Громорушкин Виктор Николаевич,***Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, grom@mtuci.ru***Варламов Олег Витальевич,***Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, vov@mtuci.ru***Ключевые слова:** ВЧ усилитель мощности, метод дефазирования, ключевой режим работы, класс D, непосредственное суммирование

Рассмотрена возможность реализации радиочастотного усилителя мощности по методу дефазирования (УМДФ) с непосредственным суммированием мощностей ключевых канальных генераторов, выполненных по схеме с переключением напряжения с фильтровой нагрузкой. Показано, что одной из причин искажений формируемого выходного сигнала является паразитная амплитудно-фазовая конверсия (АФК), возникающая при возбуждении оконечного каскада импульсами с длительностью менее полупериода рабочей частоты ($\tau_{вх} < \pi$). Выявлены физические причины возникновения АФК канальных сигналов, к которым относятся фильтровая нагрузка и диоды подложки полевых транзисторов. Предложен метод снижения искажений в УМДФ путем установки параллельно канальным нагрузкам дополнительных корректирующих индуктивностей, снижающих девиацию паразитной АФК. Показано, что алгоритм формирования канальных сигналов УМДФ оказывает существенное влияние на требуемую величину корректирующих канальных индуктивностей и, соответственно, на энергетические характеристики УМДФ в целом. Для практического применения рекомендован алгоритм знакопостоянной фазовой модуляции канальных сигналов.

Информация об авторах:

Нго Куок Фунг, аспирант кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия
Бекушев Николай Сергеевич, аспирант кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Громорушкин Виктор Николаевич, к.т.н., с.н.с., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

Нго К. Ф., Бекушев Н. С., Громорушкин В. Н., Варламов О. В. Особенности схемотехники непосредственного суммирования ключевых генераторов в передатчиках с дефазированием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 4-14.

For citation:

Q. F. Ngo, N. S. Bekushev, V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Outphasing transmitter circuit with switching generators direct summation design features," T-Comm, 2025, vol. 19, no.2, pp. 4-14. (in Russian)

Введение

Возможность осуществления управления амплитудой усиленного радиочастотного сигнала (модуляции) на высоком уровне мощности методом дефазирования [1] известна с 30-х годов прошлого века. Однако, несмотря на потенциальные преимущества усилителя мощности с дефазированием (УМДФ) в области обеспечения высокого КПД и потенциально широкой полосы модулирующих частот, до настоящего времени массового практического применения этот метод не получил. Известно только его применение в радиовещательных передатчиках диапазона СЧ [2, 3]. Основным фактором, сдерживающим распространение метода дефазирования, является проблема суммирования канальных сигналов без существенных потерь мощности. Действительно, при сложении мощностей в мостовом устройстве, средний КПД сумматора составит 50% [4], что сразу лишает УМДФ энергетических преимуществ перед линейным усилителем класса В. Предложения о рекуперации энергии из балластной нагрузки обратно в источник питания [5] сложны к применению на высоких частотах при больших уровнях мощности и идеологически не безупречны. Действительно, сначала авторы генерируют ВЧ колебания с переменной амплитудой (с потерями), потом выпрямляют половину из них (также с потерями), и далее преобразуют в постоянное напряжение источника питания (опять с потерями). По этим причинам большее распространение (в соответствии с методикой выявления [6, 7]) в сетях радиовещания различных стандартов и диапазонов частот [8-11] получил метод раздельного усиления составляющих [12]. Качественные характеристики необходимы для его построения высокочастотного [13-15] и модуляционного [16] трактов, в том числе с многофазной ШИМ [17], хорошо изучены [18].

Вместе с тем, потенциальная возможность эффективного использования метода дефазирования была обоснована авторами данной статьи в [19, 20] при анализе непосредственного сложения мощностей ключевых генераторов (КГ) с переключением напряжения. Проведенный с тех пор ряд работ [21, 22] позволил сформулировать требования на допустимые погрешности формирования канальных сигналов, но особенности схемотехники и режимов работы ключевых генераторов при таком построении УМДФ до настоящего времени в литературе не описывались.

Следует отметить, что происходящие процессы в КГ с переключением напряжения с фильтровой нагрузкой (ПНФ) при использовании их в оконечном каскаде УМДФ, могут отличаться для компонентной базы, реализованной по различным технологиям – MOSFET и GaN HEMT. В частности, если в MOSFET транзисторах обратный ток протекает через технологически не устранимый паразитный диод подложки с большим накапливаемым зарядом, то в GaN HEMT обратная проводимость осуществляется через "тело" структуры [23]. Эти отличия будут оговариваться отдельно при сохранении общности проводимого анализа.

Кроме исследованных в [22] причин нелинейных искажений имеются дополнительные факторы, которые могут существенно повлиять как на качественные, так и на энергетические характеристики передатчика. Они связаны со взаимным влиянием канальных усилителей друг на друга и изменением режимов их работы при непосредственном сложении фазомодулированных (ФМ) колебаний в общей нагрузке.

С целью выяснения происходящих процессов на предварительных этапах исследования был создан лабораторный макет модели оконечного каскада УМДФ, позволивший экспериментально провести оценку влияния процесса суммирования мощностей канальных сигналов на энергетические и качественные характеристики однополосного передатчика. Полученные в результате экспериментального исследования лабораторного макета модели УМДФ характеристики подтвердили возможность создания в настоящее время на современной элементной базе усилителя мощности, построенного по методу дефазирования, с высокими энергетическими и качественными характеристиками. Вместе с тем, был выявлен ряд проблем теоретического и практического характера, связанных с влиянием на итоговые характеристики УМДФ как структурных особенностей его построения, так и параметров и режимов работы применяемой элементной базы.

Проведенные на предварительных этапах исследования показали, что при практической реализации УМДФ оконечные канальные генераторы необходимо строить на полевых транзисторах по схеме ПНФ (ключевой генератор с переключением напряжения и фильтровой нагрузкой) с последовательным питанием. При этом оба канальных генератора образуют 4-х ключевой генератор (H-мост), нагруженный на общую фильтровую нагрузку. В такой схеме происходит непосредственное сложение по напряжению двух фазомодулированных канальных сигналов, что обеспечивает высокоэффективное формирование выходного сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ). Фильтровая нагрузка обеспечивает гармоническую форму тока и прямоугольную форму напряжения на выходах канальных генераторов. В этом режиме мощность высших гармоник не генерируется, что позволяет достичь весьма высокой энергетической эффективности.

Как известно, характерной особенностью режима работы канальных генераторов в УМДФ с непосредственным суммированием по напряжению является значительное изменение приводимой к ним нагрузки, что в свою очередь приводит к существенному изменению глубины насыщения активных элементов. По этой причине в оконечных каскадах УМДФ было рекомендовано применение полевых транзисторов, отличающихся меньшей инерционностью по сравнению с биполярными транзисторами.

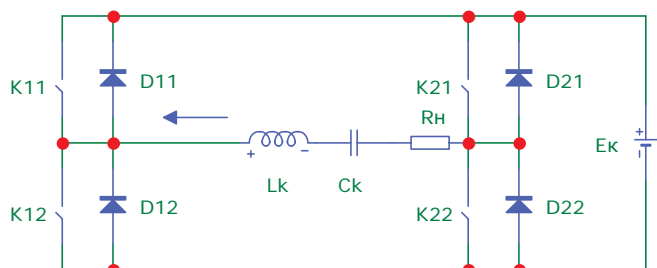
Также были рекомендованы режимы работы канальных генераторов с прямоугольной формой колебаний типа меандр (время замкнутого состояния ключей $\tau_{\text{нас}} = 180^\circ$) или с недокрытием ($\tau_{\text{нас}} < 180^\circ$), так как в режиме с перекрытием (при $\tau_{\text{нас}} > 180^\circ$) появляются сквозные токи и резко снижается КПД [18].

В настоящей работе проводится исследование влияния режима недокрытия канальных генераторов на качественные и энергетические характеристики УМДФ, конечной целью которого явилось выявление механизма возникновения искажений и разработка предложений по обеспечению требуемой линейности при высоких энергетических показателях.

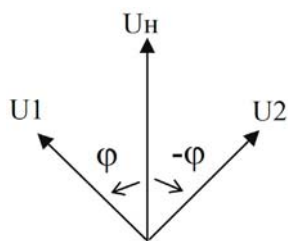
1 Качественный анализ особенностей работы ключевого генератора ПНФ в оконечном каскаде УМДФ

Для проведения качественного анализа особенностей работы ключевого генератора ПНФ в оконечном каскаде

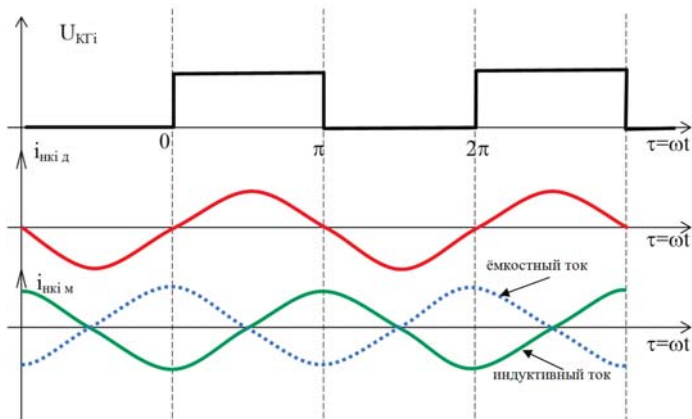
УМДФ и выявления физических причин возникновения искажений формируемых колебаний рассмотрим приведенную на рис. 1,а эквивалентную схему оконечного каскада, используя в качестве модели транзистора идеальный ключ с параллельно включенным диодом (диод подложки реального полевого транзистора). В качестве фильтра гармоник будем использовать последовательный колебательный контур, настроенный на рабочую частоту.



а) Эквивалентная схема оконечного каскада УМДФ



б) Векторная диаграмма напряжений в УМДФ



в) Эпюры напряжений и токов канального генератора УМДФ

Рис. 1. Эквивалентная схема, векторная диаграмма и эпюры, поясняющие работу УМДФ

1.1 Работа ключевого генератора с $\tau_{нас} = 180^\circ$

Рассмотрим вначале особенности работы схемы (рис. 1а) при условии, что каналные генераторы работают с $\tau_{нас} = 180^\circ$. Каждый каналный генератор генерирует при этом прямоугольную последовательность импульсов напряжения типа меандр. Будем полагать, что амплитуды напряжений первых гармоник, содержащихся в каналных сигналах, равны $U_1 = U_2 = U$. При дефазировании первые гармоники каналных напряжений сдвинуты по фазе в соответствии с требуемой мгновенной амплитудой выходного сигнала, соответственно, на величины $+\varphi$ и $-\varphi$.

Канальные напряжения в комплексной форме, соответственно, имеют вид: $U_1 \cdot e^{+j\varphi}$ и $U_2 \cdot e^{-j\varphi}$ (см. векторную диаграмму рис. 1б). Геометрическая (векторная) сумма канальных напряжений $U_H = 2U \cdot \cos(\varphi) \cdot e^{j0}$ прикладывается к общей нагрузке R_H , в результате чего в нагрузке и контуре протекает гармонический ток, выражение которого в комплексной форме имеет вид:

$$I_H = 2U \cdot G_H \cdot \cos(\varphi) \cdot e^{j0},$$

где $G_H = 1/R_H$ – проводимость общей нагрузки УМДФ.

Проводимости нагрузок $Y_{к1}$, $Y_{к2}$, приводимых к каждому каналу (на частоте 1-ой гармоники), можно определить поделив ток нагрузки (общий для обоих каналов) на соответствующее канальное напряжение:

$$Y_{к1} = \frac{2U \cdot G_H \cdot \cos \varphi}{U \cdot e^{j\varphi}} = 2 \cdot G_H \cdot \cos \varphi \cdot e^{-j\varphi}, \quad (1)$$

$$Y_{к2} = \frac{2U \cdot G_H \cdot \cos \varphi}{U \cdot e^{-j\varphi}} = 2 \cdot G_H \cdot \cos \varphi \cdot e^{+j\varphi}. \quad (2)$$

Фаза проводимости канальной нагрузки φ в выражениях (1) и (2) определена относительно напряжения первой гармоники соответствующего канального генератора.

Перейдя от показательной формы записи комплексной проводимости к алгебраической форме с помощью формулы Эйлера, получим:

$$Y_{к1} = G_H \cdot \{(1 + \cos 2\varphi) - j \sin 2\varphi\} = G_{нк1} - jB_{нк1}, \quad (1a)$$

$$Y_{к2} = G_H \cdot \{(1 + \cos 2\varphi) + j \sin 2\varphi\} = G_{нк2} + jB_{нк2}. \quad (2a)$$

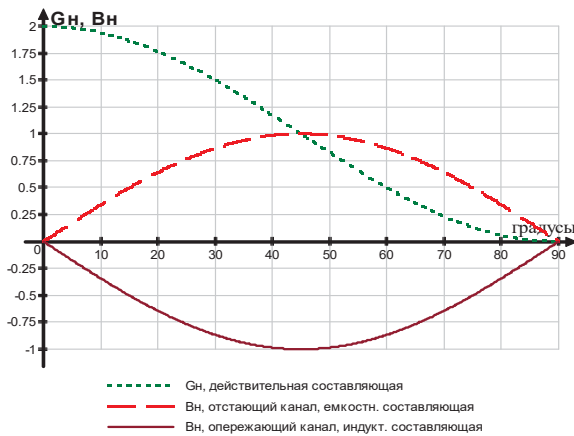
где φ – фазовый сдвиг ($0 \dots 90^\circ$) между одним из каналных сигналов и суммарным сигналом (см. рис.1,б), G_H – общая проводимость нагрузки УМДФ, $G_{нк1}$, $G_{нк2}$ – активные составляющие проводимости нагрузки соответственно в 1 и 2-ом каналах, $B_{нк1}$, $B_{нк2}$ – реактивные составляющие проводимости нагрузки в 1 и 2-ом каналах.

Из выражений (1а) и (2а) следует, что проводимости нагрузок, приводимые к каждому каналному генератору УМДФ, являются комплексно-сопряженными и изменяются в соответствии с фазовым сдвигом канальных сигналов φ . Здесь понятия комплексных величин определяются относительно напряжения соответствующего генератора.

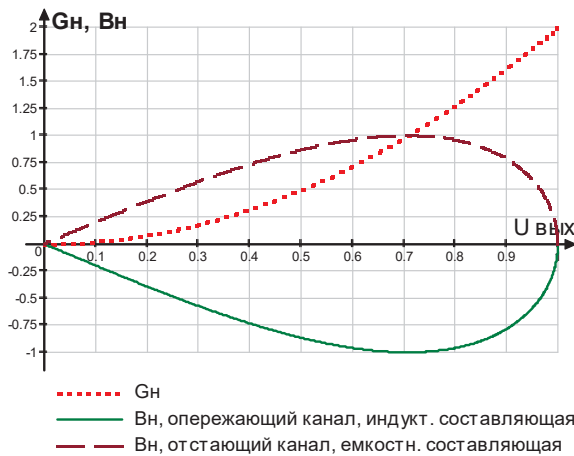
Графики зависимостей нормированных канальных проводимостей от величины фазового сдвига и величины результирующего выходного напряжения приведены на рис. 2а,б.

Резистивные составляющие проводимостей нагрузок обоих каналов равны между собой. В процессе дефазирования они синхронно изменяются от максимальной величины $2G_H$ (при синфазной работе генераторов: $\varphi=0$, выходное напряжение максимально) до нуля (при противофазной работе генераторов: $\varphi=90^\circ$, выходное напряжение равно нулю). Мнимые составляющие проводимостей имеют противоположные знаки, причем «опережающий» генератор имеет индуктивную составляющую проводимости, а «отстающий» генератор – емкостную составляющую проводимости. Из выражений (1а) и (2а) и рисунка 2 нетрудно видеть, что модуль мнимой составляющей проводимости канальной нагрузки $|B_{нк}|$ принимает максимальное значение $|B_{нк}| = G_H$

при $\varphi = 45^\circ$ и равен нулю при $\varphi = 0$ (синфазная работа) и $\varphi = 90^\circ$ (противофазная работа).



а) от фазового сдвига φ ;



б) от нормированного выходного напряжения $U_{\text{вых}} = \cos \varphi$

Рис. 2. Зависимости нормированных канальных проводимостей УМДФ

Ток, отдаваемый каждым генератором в его канальную нагрузку, определяется произведением первой гармоники его напряжения и комплексной проводимости канальной нагрузки и также имеет комплексный характер:

$$I_{\text{нк1}} = U \cdot G_n \cdot \{(1 + \cos 2\varphi) - j \sin 2\varphi\} = I_{\text{нк1д}} - j \cdot I_{\text{нк1м}}, \quad (3a)$$

$$I_{\text{нк2}} = U \cdot G_n \cdot \{(1 + \cos 2\varphi) + j \sin 2\varphi\} = I_{\text{нк2д}} + j \cdot I_{\text{нк2м}}. \quad (3б)$$

Из приведенных выражений следует, что канальные токи имеют действительные составляющие $I_{\text{нк1д}} = I_{\text{нк2д}}$, которые совпадают по фазе с напряжениями генераторов, и мнимые составляющие $(-j \cdot I_{\text{нк1м}}, j \cdot I_{\text{нк2м}})$, которые равны по модулю и имеют противоположные знаки (индуктивный ток в 1-ом, опережающем канале и емкостный ток во 2-ом, отстающем канале). На рисунке 1 в приведены эпюры выходного мгновенного напряжения канального генератора КГ1 и его мгновенного выходного тока – отдельно действительной $I_{\text{нк1д}}$ и мнимой составляющих $I_{\text{нк1м}}$ (приведенные эпюры справедливы для обоих канальных генераторов).

Действительная составляющая тока совпадает по фазе с первой гармоникой выходного напряжения канального генератора, и в моменты переключений транзисторов – переход прямоугольного напряжения генератора из «0» в «1» (при $\tau=0$) и из «1» в «0» (при $\tau=\pi$) – принимает нулевые значения. Мнимая составляющая тока, напротив, в моменты переключений принимает свое максимальное значение. Напомним, что на приведенных эпюрах, также как в выражениях (1а) и (2а), фаза токов и понятия комплексных величин определяются по отношению к выходному напряжению соответствующего канального генератора. Поэтому эпюры, приведенные на рис. 1в, справедливы для обоих генераторов, за исключением мнимой составляющей тока – в опережающем генераторе она носит индуктивный характер, а в отстающем – емкостный.

Отметим, что при работе канальных генераторов в режиме с меандрами ($\tau_{\text{нас}}=180^\circ$) к контуру и нагрузке R_n через два замкнутых ключа подключается источник питающего напряжения E_k (в той или иной полярности), либо в случае $\varphi \neq 0$ фильтровая нагрузка в течение части ВЧ периода закорачивается парой (верхних или нижних) ключей обоих генераторов. Таким образом, источником сигнала для фильтровой нагрузки является генератор напряжения с постоянно малым выходным сопротивлением $2 \cdot r_{\text{нас}}$.

1.2 Работа ключевого генератора с $\tau_{\text{нас}} < 180^\circ$

Рассмотрим теперь работу генератора по схеме рис. 1а при $\tau_{\text{нас}} < 180^\circ$, т.е. когда возбуждающие напряжения на затворах транзисторов каждого генератора противофазны, а длительность отпирающих импульсов на затворах менее 180° . В этом режиме появляются этапы недокрытия - интервалы времени, в течение которых оба ключа генератора ПН разомкнуты. На периоде рабочей частоты имеются два интервала недокрытия - в окрестностях точек $\tau=0$ и $\tau=\pi$ (см. рис. 1,в), когда мгновенное значение действительной составляющей канального тока близко к нулю, а мгновенное значение мнимой составляющей – максимально.

Рассмотрим два возможных случая: **А** и **В**:

А – выходное напряжение канального генератора КГ1 (ключи К11, К12 на рис. 1а) опережает по фазе напряжение канального генератора КГ2 (ключи К21, К22 на рис. 1а). В этом случае общий ток нагрузки отстает по фазе от напряжения канального генератора КГ1, и проводимость канальной нагрузки $Y_{к1}$ и его канальный ток носят индуктивный характер.

В – выходное напряжение канального генератора КГ1 отстает по фазе от напряжения канального генератора КГ2. В этом случае общий ток нагрузки опережает по фазе напряжение канального генератора КГ1, и проводимость канальной нагрузки $Y_{к1}$ и канальный ток носят емкостный характер.

Проанализируем случай **А**, когда проводимость канальной нагрузки имеет индуктивный характер.

Сначала исследуем интервал недокрытия в окрестностях точки $\tau=0$. Непосредственно перед этим интервалом ключ К12 был замкнут, обеспечивая нулевое напряжение на выходе генератора КГ1, а ключ К11 соответственно был разомкнут (см. эпюры рис. 1в). Как отмечалось ранее, при $\tau \approx 0$ действительная составляющая тока канальной нагрузки рав-

на нулю, и ток определяется мнимой составляющей, мгновенное значение которой в рассматриваемом случае положительно (см. рис. 1в). Таким образом, мгновенный ток нагрузки i_n протекает в направлении стрелки на рис. 1а. На этапе недокрытия ключ K12 уже разомкнулся (окончился отпирающий импульс на затворе), а ключ K11 еще не замкнулся (отпирающий импульс на затворе еще не появился). Разомкнутые ключи прерывают путь для протекания тока нагрузки, и, в соответствии с законами коммутации, на индуктивности контура развивается ЭДС самоиндукции, которая открывает диод подложки D11. При этом ток нагрузки i_n потечет через открывшийся диод. Это эквивалентно тому, что ключ K11 замкнут: напряжение на нем близко к нулю и по нему протекает ток нагрузки. Таким образом, транзистор (комбинация: ключ K11 + диод D11) замыкается в момент размыкания ключа K12, т.е. раньше, чем появляется отпирающее напряжение на затворе этого транзистора.

Затем на затвор транзистора K11 приходит отпирающий импульс, который замыкает ключ K11 и удерживает его в замкнутом состоянии в течение примерно полупериода – до своего окончания в окрестностях точки $\tau=\pi$ (см. рис. 1в). В результате время нахождения транзистора (ключ K11 + диод D11) в замкнутом состоянии $\tau_{нас}$ увеличивается до полупериода рабочей частоты $\tau_{нас}\approx\pi$.

Теперь рассмотрим интервал недокрытия в окрестностях точки $\tau=\pi$.

Через половину периода рабочей частоты, в окрестностях точки $\tau=\pi$, мгновенное значение мнимой составляющей тока нагрузки сменит полярность (см. рис. 1в). Непосредственно перед этим интервалом ключ K11 был замкнут, обеспечивая напряжение +Ек на выходе генератора КГ1, а ключ K12 соответственно был разомкнут. На интервале недокрытия ключ K11 уже разомкнулся (окончился отпирающий импульс на затворе), а ключ K12 еще не замкнулся (отпирающий импульс на затворе еще не появился). Разомкнутые ключи прерывают путь для протекания тока нагрузки, мгновенное значение которого теперь направлено против стрелки на рисунке 1а.

На этом интервале недокрытия ЭДС самоиндукции откроет нижний диод D12, что эквивалентно замыканию ключа K12, который будет оставаться замкнутым в течение полупериода, т.е. до тех пор, пока не окончится отпирающий импульс на его затворе.

Таким образом, несмотря на то что в рассматриваемом режиме недокрытия отпирающие импульсы напряжения на затворах транзисторов имеют длительность менее полупериода, выходное напряжение генератора имеет форму меандра, моменты переключения которого совпадают с задними фронтами отпирающих импульсов на затворах транзисторов.

Вследствие этого первая гармоника выходного напряжения КГ1 (меандр) опережает по фазе возбуждающее колебание (первую гармонику возбуждающих импульсов) на половину этапа недокрытия.

Проанализируем случай В, когда проводимость канальной нагрузки имеет емкостный характер.

Рассмотрим сначала интервал недокрытия в окрестностях точки $\tau=0$. Непосредственно перед этим интервалом ключ K12 был замкнут, обеспечивая нулевое напряжение на выходе генератора КГ1, а ключ K11 соответственно был разомкнут.

В случае емкостного характера проводимости нагрузки в окрестностях точки $\tau=0$ мгновенное значение тока отрицательно (см. эпюры рис. 1,в). Ток нагрузки протекает в направлении противоположном стрелке (см. рис. 1,а). В этом случае на этапе недокрытия за счет ЭДС самоиндукции откроется нижний диод D12. Это эквивалентно тому, что ключ K12 продолжает оставаться замкнутым, несмотря на то что отпирающий импульс на его затворе уже окончился. По окончании интервала недокрытия (с приходом отпирающего импульса на затвор верхнего ключа), ключ K11 замыкается и перехватывает ток нагрузки. Обесточенный диод D11 восстанавливается, что эквивалентно размыканию ключа K12.

Таким образом процесс переключения транзисторов генератора КГ1 происходит синхронно в момент переднего фронта возбуждающих импульсов на затворе верхнего ключа K11.

Теперь рассмотрим интервал недокрытия в окрестностях точки $\tau=\pi$.

Через половину периода рабочей частоты на следующем этапе недокрытия ток нагрузки сменит полярность и откроется верхний диод D11. Открывание диода снова происходит в самом начале интервала недокрытия. Транзисторы переключаются опять синхронно и переключение происходит на переднем фронте возбуждающих импульсов на затворе нижнего ключа K12.

В результате транзисторы (ключи + диоды) будут находиться в состоянии насыщения ровно половину периода ($\tau_{нас}=180^\circ$), и выходное напряжение генератора будет иметь форму меандра. Моменты фронтов выходного напряжения соответствуют передним фронтам отпирающих импульсов на затворах транзисторов. Вследствие этого первая гармоника выходного напряжения будет отставать по фазе от возбуждающего колебания на половину этапа недокрытия.

Как было показано выше, при дефазировании двух генераторов в УМДФ каждый из них работает на комплексно-сопряженную нагрузку, т.е. один на индуктивную (случай А), второй на емкостную (случай В). Отсюда следует, что суммарный фазовый сдвиг канальных сигналов (напряжений U1 и U2) равен полной величине этапа недокрытия, определяемого формой возбуждающего сигнала.

Как было показано в [16], наличие фазового сдвига канальных сигналов приводит к появлению нелинейных искажений выходного сигнала УМДФ. Так, например, для обеспечения уровня комбинационных искажений не более -26...-30 дБ паразитный фазовый сдвиг канальных сигналов не должен превышать $5^\circ...9^\circ$. Отсюда следует, что этап недокрытия канальных генераторов также не должен превышать величины $5^\circ...9^\circ$, а длительность возбуждающих импульсов $\tau_{вх}$, соответственно, должна находиться в пределах: $180^\circ > \tau_{вх} > 175^\circ...171^\circ$. Очевидно, что удерживать значение длительности возбуждающих импульсов $\tau_{вх}$ в таких жестких рамках в реальных условиях эксплуатации весьма сложно.

Подводя итог проведенному исследованию особенностей работы ключевых генераторов ПНФ в оконечном каскаде УМДФ, где эти генераторы работают на комплексную согласованную нагрузку, можно сделать вывод, что в случае возбуждения генераторов прямоугольными импульсами с недокрытием ($\tau_{вх} < \pi$) возникают нелинейные искажения выходного однополосного сигнала за счет появляющегося паразитного фазового сдвига канальных сигналов.

В случае, когда один из канальных сигналов всегда опережает (или отстает) второй канальный сигнал – фазовый сдвиг носит постоянный характер. Если канальные сигналы попеременно являются отстающими и опережающими – фазовый сдвиг становится переменным и представляет собой паразитную амплитудно-фазовую манипуляцию.

Выявлены две физические причины возникновения паразитного фазового сдвига канальных сигналов при недокрытии.

Первой причиной является энергоемкий фильтр гармоник, обеспечивающий гармонический ток в нагрузке, и, в частности, его продольная индуктивность. Напомним, что любой фильтр гармоник для генератора ПНФ должен начинаться с подобной индуктивности [18]. Второй причиной является наличие диода подложки полевого транзистора, который является неотъемлемой технологической особенностью любого прибора этого класса.

Совокупность этих элементов (индуктивности фильтровой нагрузки и диода подложки) приводит к тому, что состояние ключевых элементов (замкнут / разомкнут) определяется не только входным управляющим сигналом, но и током нагрузки.

В следующем разделе будут рассмотрены возможные способы устранения паразитных фазовых сдвигов канальных сигналов.

2 Способы снижения паразитных фазовых сдвигов

Одним из способов снижения паразитных фазовых сдвигов – постоянных сдвигов или фазовой манипуляции – является использование различных видов фазовых корректоров или обратной связи, соответственно.

В тоже время, как следует из предыдущего раздела, основной причиной появления фазовых сдвигов является реактивное рассогласование разных знаков в нагрузках канальных генераторов. В связи с этим предлагается установить дополнительную реактивную проводимость (нагрузку) на выходе одного из канальных генераторов, такую, чтобы оба канала имели реактивную проводимость нагрузки одного знака. В этом случае канальные напряжения будут синхронно опережать либо отставать по фазе от возбуждающих канальных сигналов, но фазовой асимметрии не будет. Соответственно, не будет и искажений выходного сигнала УМДФ. Известно [25], что емкостная проводимость нагрузки ключевого генератора ПНФ резко снижает его КПД, из-за сквозных токов, связанных с инерционностью диода подложки. Поэтому предпочтительнее обеспечить в обоих каналах индуктивный характер проводимости нагрузки.

Как было показано выше (см. рис. 2 и выражения (1а) и (2а)), отстающий генератор имеет емкостную составляющую проводимости нагрузки с максимальным значением, равным $B_{нк} = +j \cdot G_n$. Чтобы обеспечить в отстающем канале реактивную проводимость нагрузки того же знака, как в опережающем канале, необходимо к его выходу подключить дополнительную индуктивность L_{kk} с проводимостью, не менее $-j \cdot G_n$. В этом случае дополнительная индуктивная проводимость скомпенсирует емкостную проводимость нагрузки отстающего канала (см. рис. 2). При этом в обоих каналах реактивная проводимость нагрузки будет иметь индуктивный характер с максимальным (по модулю) значением G_n и минимальным значением равным нулю.

Отметим, что при нулевой реактивной проводимости канальной нагрузки процессы переключения транзисторов на этапах недокрытий становятся неопределенными. Действительно, оба транзистора канального генератора разомкнуты, и ток нагрузки практически нулевой. В связи с этим, как будет показано ниже, проводимость корректирующей индуктивности L_{kk} должна быть несколько больше, чем G_n .

Формирователь канальных сигналов (ФКС) может формировать сигналы по двум алгоритмам [26]. В первом алгоритме один из канальных сигналов всегда опережает второй. В этом случае фазовый сдвиг одного сигнала имеет только положительные значения, а второго сигнала – только отрицательные (см. рис. 1б). Будем называть такой алгоритм работы ФКС «знакопостоянная фазовая модуляция канальных сигналов». В этом случае для устранения паразитного фазового сдвига канальных сигналов, достаточно установить корректирующую индуктивность L_{kk} только на выходе отстающего канала, который имеет емкостную проводимость нагрузки.

Во втором алгоритме, предложенном в [26], канальные сигналы имеют относительно друг друга попеременно положительные и отрицательные фазовые сдвиги. Будем называть такой алгоритм работы ФКС «знакопеременная фазовая модуляция канальных сигналов». В этом случае проводимости нагрузки каждого канального генератора имеют попеременно индуктивный и емкостный характер. При этом для устранения паразитного фазового сдвига необходимо в каждом канальном генераторе установить корректирующую индуктивность L_{kk} с проводимостью не менее $-j \cdot G_n$. Однако обеспечить равенство максимальных реактивных проводимостей нагрузки в каналах все равно не удастся. В отстающем канале максимальная по модулю суммарная реактивная проводимость нагрузки с учетом (1а), (1б) составит: $j \cdot G_n - j \cdot G_n = 0$, а в опережающем канале $-j \cdot G_n - j \cdot G_n = -2 \cdot j \cdot G_n$. Таким образом, в опережающем канале реактивная проводимость нагрузки будет значительно превышать необходимое значение, что при проектировании приведет к необходимости выбора транзисторов с увеличенными предельно допустимыми токами.

Из выше сказанного следует, что наиболее предпочтительным алгоритмом работы ФКС является знакопостоянная фазовая модуляция канальных сигналов.

Оценить эффективность предлагаемого способа снижения паразитного фазового сдвига канальных сигналов с помощью рассмотренной выше эквивалентной схемы (рис. 1а) не представляется возможным. В связи с этим далее проводится компьютерное моделирование оконечного каскада УМДФ в программной среде «Micro-Cap 12» с использованием более сложных адекватных моделей элементов схемы.

3 Моделирование процессов в схеме с непосредственным суммированием ключевых генераторов в УМДФ

Анализ режима работы оконечного каскада УМДФ будем проводить в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3. Здесь одно плечо оконечного каскада реализовано на MOSFET транзисторах (для примера используется IRFP 244). В качестве второго плеча оконечного каскада (второго канального генератора) в рассматриваемой модели

применяется генератор синусоидального напряжения (V4). Адекватность такой модели рассмотренной ранее схеме (рис. 1а) будет показана ниже.

Нагрузкой обоих каналных генераторов является резистор R1, подключенный к их выходам через колебательный контур L6,C1, настроенный на рабочую частоту $f_p=500$ кГц и имеющий нагруженную добротность $Q_n \approx 3$. Этот контур (фильтр гармоник) обеспечивает фильтровую нагрузку для каждого каналного генератора, т.е. высокое реактивное сопротивление по высшим гармоникам. В результате контур развязывает каналные генераторы друг от друга по высшим гармоникам и взаимное влияние генераторов может быть только по первой гармонике. На этом основании при анализе режима работы одного из генераторов второй можно заменить синусоидальным генератором (первой гармоники), как это показано на рисунке 3.

При этом амплитуда напряжения гармонического генератора V4 выбрана равной амплитуде первой гармоники ключевого генератора при $\tau_{нас}=180^\circ$. Цепи затворов ключевого генератора, реализованного на транзисторах IRFP 244, возбуждаются противофазными прямоугольными двуполярными импульсами напряжения от генераторов E1 и E2 (см. рис. 3). При анализе относительная длительность $\tau_{вх}$ отпирающих импульсов может быть задана в пределах $0 < \tau_{вх} < \pi$. Во входной цепи каждого транзистора установлены последовательные RL цепочки (см. рис. 3), моделирующие элементы практически используемой схемотехники.

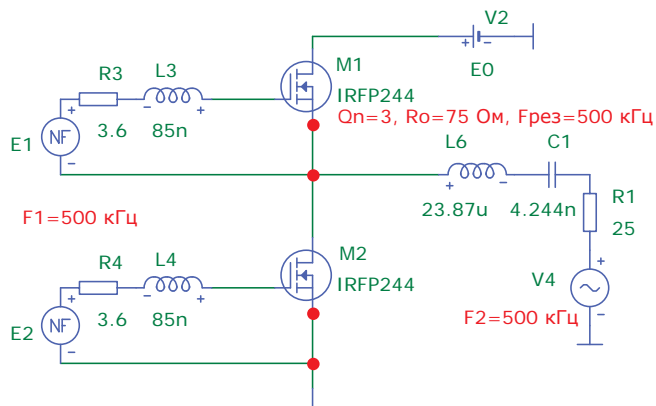


Рис. 3. Схема анализируемой модели УМДФ в статическом режиме

4 Статический режим работы УМДФ

Вначале был проведен анализ схемы рис. 3 в статическом режиме при длительности отпирающих импульсов $\tau_{вх}=135^\circ$. Этот режим аналогичен тому, что был рассмотрен на упрощенной модели в предыдущем разделе. Оба канала возбуждались сигналами с частотой 500 кГц, соответствующей резонансной частоте фильтрующего контура L6,C1 и различными начальными фазами. Результаты анализа приведены на рисунке 4 в виде эпюр токов и напряжений, действующих в схеме рисунка 3. Эпюры приведены для двух случаев:

а) напряжение канального генератора V4 отстает по фазе от напряжения возбуждения транзисторного канального генератора на 30° ; при этом проводимость нагрузки транзисторного генератора носит индуктивный характер;

б) напряжение канального генератора V4 опережает по фазе напряжение возбуждения транзисторного канального

генератора на 30° ; при этом проводимость нагрузки транзисторного генератора носит емкостный характер. Напомним, что режиму максимальной выходной мощности в схеме рисунка 3. соответствует нулевой фазовый сдвиг $\varphi=0$.

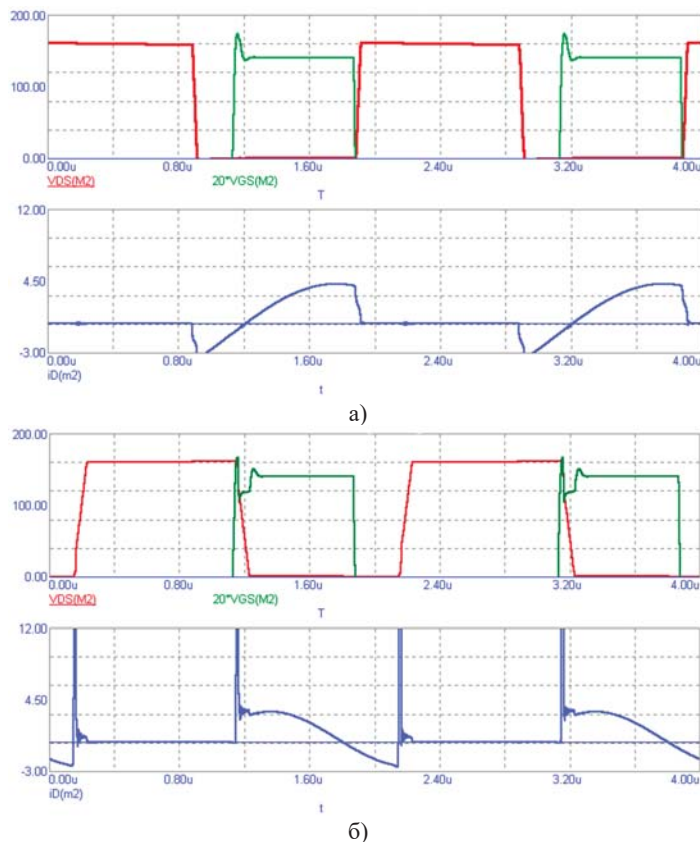


Рис. 4. Эпюры напряжения на стоке (VDS(M2)), затворе (VGS(M2)) и тока стока (iD(m2)) транзистора M2 при $\tau_{вх}=135^\circ$ в статическом режиме, рабочая частота 500 кГц, фазовый сдвиг правого канального генератора V4: а) -30° ; б) $+30^\circ$

На верхних эпюрах (рис. 4а,б) красным цветом приведено напряжение сток-исток транзистора M2 (оно же является выходным напряжением левого канала УМДФ), а зеленым цветом – напряжение возбуждения (затвор-исток) транзистора M2 (увеличенное для наглядности в 20 раз). При этом на эпюрах показаны только положительные (отпирающие) полуволны возбуждающего напряжения. На нижних эпюрах (рис. 4а,б) синим цветом приведены эпюры тока стока транзистора M2.

Анализ приведенных на рисунке 4а эпюр тока и напряжения показывает, что нагрузка канального генератора носит индуктивный характер - ток стока отстает от выходного напряжения, причем, ток стока принимает отрицательные значения в начале этапа проводимости транзистора M2. Этот отрицательный ток течет через диод подложки, поскольку на этом этапе ($t = 0,9 \dots 1,1$ мкс) напряжение на затворе отрицательное и транзистор по затвору должен быть заперт. Затем напряжение на затворе становится положительным (при $t > 1,1$ мкс), транзистор отпирается по входу и пропускает как отрицательные, так и положительные токи. С окончанием отпирающего импульса на затворе ($t = 1,9$ мкс) транзистор размыкается и ток через него не течет, протекание тока нагрузки обеспечивает второй транзистор – M1.

Важно отметить, что на приведенных эюрах (рис. 4а) транзистор находится в проводящем состоянии половину периода рабочей частоты, в то время как отпирающее напряжение на затворе имеет меньшую длительность ($\tau_{\text{вх}}=135^\circ$). Выходное напряжение имеет форму меандра и опережает по фазе напряжение возбуждения. При этом замыкается транзистор синхронно с задним фронтом отпирающего импульса на затворе (напряжение на стоке нарастает от 0 до $E_0=160\text{ В}$), а замыкается раньше, чем появляется отпирающее напряжение на затворе.

Обратимся к эюрам, приведенным на рисунке 4б. Здесь нагрузка канального генератора носит емкостный характер - ток стока опережает выходное напряжение, причем, ток стока принимает отрицательные значения в конце этапа проводимости транзистора M2. Транзистор отпирается синхронно с фронтом отпирающего импульса на затворе. В конце этапа проводимости открывается диод подложки и транзистор находится в открытом состоянии, несмотря на то что к затвору приложено запирающее напряжение. Здесь также транзистор находится в проводящем состоянии половину периода рабочей частоты и выходное напряжение близко к меандру. Однако выходное напряжение отстает от напряжения возбуждения.

Как видно из приведенных на рисунке 4а,б эюров, компьютерное моделирование подтвердило результаты анализа режима работы окончных канальных генераторов ПНФ при недокрытии, полученные в предыдущем разделе при анализе упрощенной эквивалентной схемы.

Рассмотрим теперь, как влияет на режим работы окончного каскада УМДФ установка на выходе канального генератора рекомендованной в предыдущем разделе корректирующей индуктивности L_{kk} . Модель окончного каскада с корректирующей индуктивностью $L_{\text{kk}}=3,98\text{ мкГн}$ приведена на рисунке 5.

Величина индуктивности выбрана в соответствии с разработанными ранее рекомендациями такой, чтобы ее проводимость на рабочей частоте 500 кГц равнялась удвоенной проводимости общей нагрузки УМДФ $|B_{L_{\text{kk}}}| = 2/25\text{ Ом}^{-1}$. В качестве разделительной емкости в схеме рис.5 используется источник постоянного напряжения V5 с номинальным напряжением $E_0/2$ равным половине напряжения питания окончного каскада. Такое решение позволяет существенно сократить время переходных процессов и время анализа при компьютерном моделировании. Остальные элементы и параметры возбуждения аналогичны предыдущей схеме (рис. 3).

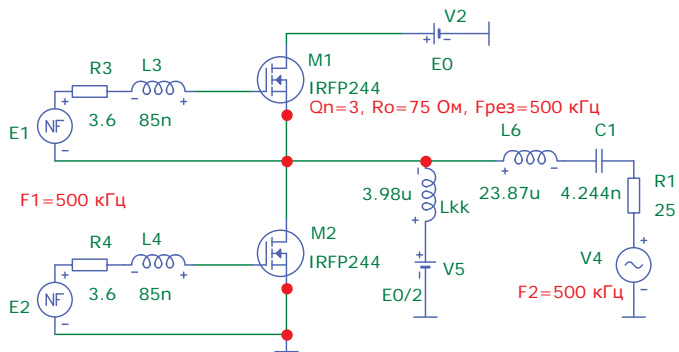


Рис. 5. Модель окончного каскада УМДФ с корректирующей индуктивностью L_{kk}

Результаты анализа схемы с корректирующей индуктивностью (рис. 5) в виде эюров приведены на рис. 6,а,б, для двух вариантов фазового сдвига возбуждающего напряжения правого по схеме генератора V4, соответственно, $\varphi = -30^\circ$ и $\varphi = +30^\circ$. Как видно из приведенных эюров, выходное напряжение ключевого канального генератора имеет форму меандра и всегда опережает напряжение возбуждения независимо от знака фазового сдвига между канальными генераторами. Отсюда следует, что паразитный фазовый сдвиг не возникает.

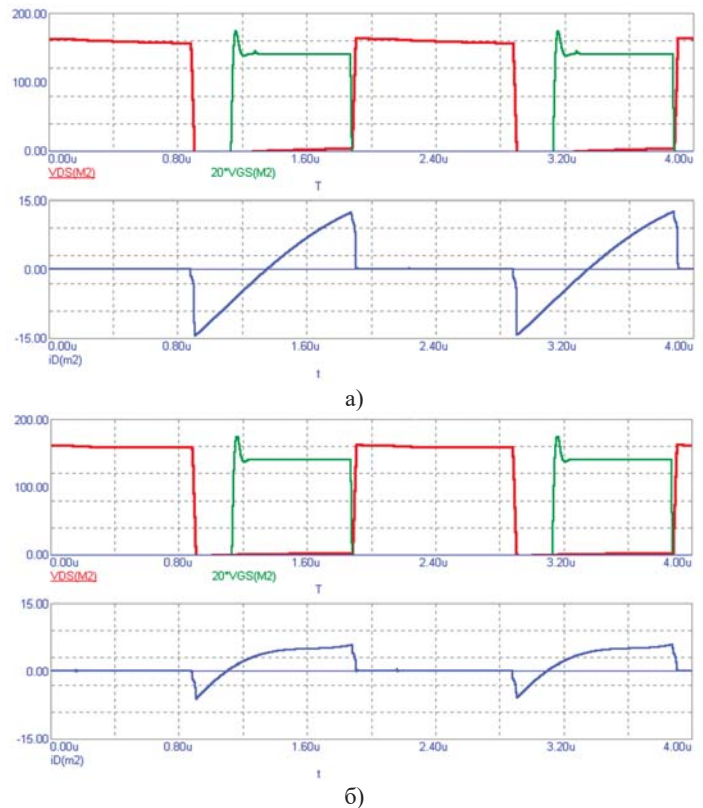


Рис. 6. Эюры напряжения на стоке ($V_{\text{DS}}(M2)$), затворе ($V_{\text{GS}}(M2)$) и тока стока ($i_{\text{D}}(m2)$) транзистора M2 при включении L_{kk} , $\tau_{\text{вх}}=135^\circ$ в статическом режиме, рабочая частота 500 кГц, фазовый сдвиг правого канального генератора V4: а) -30° ; б) $+30^\circ$

Таким образом, компьютерное моделирование подтвердило результаты анализа режима работы окончного каскада УМДФ с корректирующей индуктивностью L_{kk} , полученные в предыдущем разделе при анализе упрощенной эквивалентной схемы.

К дополнительным положительным свойствам схемы канального генератора с корректирующей индуктивностью следует отнести снижение коммутативных потерь. Действительно, на этапе недокрытия в генераторе разомкнуты оба транзистора, и их выходные емкости перезаряжаются током корректирующей индуктивности, аналогично тому, как это происходит в ключевых генераторах класса E с формирующим контуром [25]. При этом, в отличие от класса E, здесь не нужно точно согласовывать величины корректирующей индуктивности, выходных емкостей и нагрузки, поскольку избыток реактивной энергии корректирующих индуктивностей возвращается в источник питания посредством протекания тока через открывающиеся диоды подложки полевых

транзисторов. Рассматриваемый генератор с корректирующей индуктивностью (рис. 5) объединяет достоинства генераторов класса D – низкие выходные сопротивление и пикфактор напряжения на транзисторах, и достоинства генераторов класса E – отсутствие коммутативных потерь. В связи с этим логично обозначать предложенный режим работы канального генератора с дополнительной индуктивностью L_{kk} классом DE, аналогично [27].

К недостаткам предлагаемого способа устранения паразитных фазовых сдвигов следует отнести увеличение максимальных токов, протекающих через транзисторы. Действительно, приняв максимальную активную проводимость нагрузки канального генератора за единицу (при $\varphi=0$), добавив к ней параллельно такую же реактивную проводимость корректирующей индуктивности $-j1$ и, приняв во внимание, что при дефазировании комплексная часть проводимости канальной нагрузки при $\varphi=0$ равна 0 (рис. 2), модуль суммарной проводимости будет составлять $[1^2 + 1^2]^{1/2} = 1,41$. Очевидно, что при возросшей на 41% проводимости нагрузки на такую же величину возрастет максимальный выходной ток канального генератора, что следует учитывать при его проектировании. Ток корректирующей индуктивности носит реактивный характер и, протекая через сопротивление насыщения транзисторов, создает в них дополнительные потери.

Заключение

Проведенный анализ работы УМДФ показал, что одной из причин искажений формируемого выходного сигнала является паразитная АФК, возникающая при возбуждении оконечного каскада импульсами с длительностью менее полупериода рабочей частоты ($\tau_{вх} < \pi$).

Выявлены физические причины возникновения АФК канальных сигналов, к которым относятся фильтровая нагрузка и диоды подложки полевых транзисторов.

Предложен метод снижения искажений в УМДФ путем установки параллельно канальным нагрузкам дополнительных корректирующих индуктивностей, снижающих девиацию паразитной АФК.

Показано, что алгоритм формирования канальных сигналов УМДФ оказывает существенное влияние на требуемую величину корректирующих канальных индуктивностей и, соответственно, на энергетические характеристики УМДФ в целом. Для практического применения рекомендован алгоритм знакопостоянной фазовой модуляции канальных сигналов.

Литература

1. Chireix H. High power outphasing modulation // Proc. IRE 1935, 23, pp. 1370-1392.
2. S7HP NEO. Medium wave radio transmitter / Product brochure - S7HP Neo. URL: https://thomsonbroadcast.tv/wp-content/uploads/2021/10/S7HP-NEOEN_RVB-compresse.pdf, дата обращения 25.10.2024.
3. Westberg J., Richard H. 4M Modulation / Broadcast Electronics, 2004. URL: https://www.fredsforum.nl/pdf/4MX_White_Paper_4M_Modulation_VCEWHP.pdf, дата обращения 25.10.2024.
4. Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкин С.Е. Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 9. С. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16.
5. Лосев А.А. Разработка и анализ технических решений усилителя мощности спутникового ретранслятора, построенного методом дефазирования // диссертация на соискание ученой

степени кандидата технических наук / Московский технический университет связи и информатики. Москва, 2017.

6. Дымкова С.С. Разработка информационной системы для продвижения результатов научных исследований // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 7. С. 38-41. EDN: ZBQMBT.

7. Dymkova S.S. Methods of indicators analysing for universities publication activity by discipline "radio engineering" // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings. 2022. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744312.

8. 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.

9. 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.

10. Dolgopyatova A.V., Varlamov O.V. Analysis of long-range VHF radio waves propagation to specify protection ratios between coexisting DRM+, RAVIS and IBOC systems // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings. 2021. С. 9488392.

11. Pastukh A., Tikhvinskiy V., Dymkova S.S., Varlamov O.V. Challenges of using the L-band and S-band for direct-to-cellular satellite 5G-6G NTN systems // Technologies. 2023. Т. 11. № 4. С. 110. DOI: 10.3390/technologies11040110.

12. Нгуен Д.К., Варламов О.В. Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ-усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 10-18.

13. Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 10. С. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-10-4-11.

14. Varlamov O.V. Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers // В сборнике: 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings. 2022. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320.

15. Громорушкин В.Н. Разработка фильтра гармоник для коротковолнового ключевого передатчика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 20-23. EDN: SZZOQV

16. Варламов О.В. Построение мощных широкополосных усилителей постоянного тока модуляционного тракта передатчиков с раздельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14.

17. Varlamov O.V. Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path // В сборнике: 2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021 - Proceedings. 2021. С. 9619166. DOI: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.

18. Варламов О.В. Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2014. -№ 2. -С. 59-60. EDN: SARICJ.

19. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N., Kozyrev V.B., Melanin A.V. Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load // Radioelectronics and Communications Systems. 1989. Т. 32. № 7. С. 30-35. EDN: KNLLOC

20. Varlamov O.V., Goncharov I.A., Lavrushenkov V.G. High-power HF digital-analog converter for SSB signal power amplifiers // Telecommunications and Radio Engineering. 1989. Т. 44. № 8. С. 49-53. EDN: ZGKWFA

21. *Иванюшкин Р.Ю.* Исследование и разработка высокочастотного тракта радиовещательного СЧ передатчика, построенного по методу дефазирования // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский технический университет связи и информатики. Москва, 2001.

22. *Варламов О.В.* Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский технический университет связи и информатики. Москва, 2017. EDN: ZQMQUAF

23. *Грычкин С.Е., Захаров А.М., Варламов О.В.* Методика расчета КПД ШИМ модулятора на GAN FET транзисторах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 9. С. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27.

24. *Козырев В.Б., Лаврушенко В.Г., Леонов В.П. и др.* Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме. Под ред. Попова И.А. М.: Радио и связь, 1985.

25. *Cripe D.W.* Improving the efficiency and reliability of AM broadcast transmitters through class-E power / Broadcast Electronics, URL: <https://bh.hallikainen.org/uploads/BeAmClassE.pdf>, дата обращения 25.10.2024.

26. *Hetzel S.A., Bateman A., McGeehan J.P.* Line transmitter // Electronics letters. 9th May 1991. Т. 27. № 10. С. 133-137.

27. *Алунов А.С.* Исследование и разработка ключевых усилителей мощности для высокоэффективного СЧ передатчика цифрового радиовещания // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский технический университет связи и информатики. Москва, 2006.

OUTPHASING TRANSMITTER CIRCUIT WITH SWITCHING GENERATORS DIRECT SUMMATION DESIGN FEATURES

Ngo Quoc Fung, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, quocphung47@gmail.com

Nikolay S. Bekushev, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, mnikolaysk@mail.ru

Viktor N. Gromorushkin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, grom@mtuci.ru

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Abstract

The paper considers the possibility of implementing a radio-frequency power amplifier (PA) using the outphasing method with direct summation of switching generators powers implemented as voltage mode class D with a filter load. It is shown that one of the causes of generated output signal distortions is parasitic amplitude-phase conversion (APC), which occurs when the output stage is excited by pulses with a duration of less than a half-period of the operating frequency ($\tau_{in} < \pi$). The physical causes of channel signals APC, which include the filter load and field-effect transistors body diode, are revealed. A method is proposed for reducing distortions in the outphasing PA by installing additional correcting inductances in parallel with the channel loads, which reduce the parasitic APC deviation. It is shown that the algorithm for generating outphasing PA channel signals has a significant effect on the required value of the correcting channel inductances and, accordingly, on the PA energy characteristics as a whole. For practical application, the algorithm of constant-sign phase modulation of channel signals is recommended.

Keywords: RF power amplifier, outphasing method, switching operating mode, class D, direct summation

References

- [1] H. Chireix, "High power outphasing modulation," *Proc. IRE*. 1935, no. 23, pp. 1370-1392.
- [2] S7HP NEO. Medium wave radio transmitter / Product brochure - S7HP Neo. URL: https://thomsonbroadcast.tv/wp-content/uploads/2021/10/S7HP-NEOEN_RVB-compress.pdf, Date of access: 25.10.2024.
- [3] J. Westberg, H. Richard, "4M Modulation / Broadcast Electronics," 2004. URL: https://www.fredsforum.nl/pdf/4MX_White_Paper_4M_Modulation_BCE-WHP.pdf, Date of access: 25.10.2024.
- [4] O.V. Varlamov, D.C. Nguyen, S.E. Grychkin, "Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques," *T-Comm*. 2021, vol. 15, no.9, pp. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16.
- [5] A.A. Losev, "Development and analysis of technical solutions for a satellite repeater power amplifier built using the outphasing method," Ph.D. Thesis / Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, 2017.
- [6] S.S. Dymkova, "Development of information system for promotion of scientific research results," *T-Comm*, vol. 11, no.7, 2017, pp. 38-41.
- [7] S.S. Dymkova, "Methods of indicators analysing for universities publication activity by discipline "radio engineering"," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings*. 2022. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744312.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] A.V. Dolgopyatova, O.V. Varlamov, "Analysis of long-range VHF radio waves propagation to specify protection ratios between coexisting DRM+, RAVIS and IBOC systems," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings*. 2021. P. 9488392. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488392.
- [11] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, S.S. Dymkova, O.V. Varlamov, "Challenges of using the L-band and S-band for direct-to-cellular satellite 5G-6G NTN systems," *Technologies*. 2023. Vol. 11. No. 4, pp. 110. DOI: 10.3390/technologies11040110.
- [12] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load," *H&ES Research*. 2022. Vol. 14. No 2, pp. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.
- [13] O.V. Varlamov, "Intermodulation distortion in voltage mode class D switching amplifiers with resistive load," *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.10, pp. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-10-4-11.
- [14] O.V. Varlamov, "Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings*. 2022. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320.
- [15] V.N. Gromorushkin, "Developing a harmonic filter for short-wave switching transmitter," *T-Comm*, 2014, vol. 8, no. 10, pp. 20-23.
- [16] O.V. Varlamov, "Powerful broadband DC amplifiers for modulation path of transmitters with separate amplification," *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.11, pp. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14.
- [17] O.V. Varlamov, "Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path," *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021 - Proceedings*. 2021. P. 9619166. DOI: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.
- [18] O. Varlamov, "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 2, pp. 59-60.
- [19] O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, V.B. Kozyrev, A.V. Melanin, "Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load," *Radioelectronics and Communications Systems*. 1989, vol. 32. no 7, pp. 30-35. .
- [20] O.V. Varlamov, I.A. Goncharov, V.G. Lavrushenkov, "High-power HF digital-analog converter for SSB signal power amplifiers," *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, vol. 44, no. 8, pp. 49, 1989.
- [21] R.Yu. Ivanyushkin, "Research and development of a high-frequency path of a radio broadcasting MF transmitter built using the outphasing method," Ph.D. Thesis / Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, 2001.
- [22] O.V. Varlamov, "The Technology of Creating a Digital Broadcasting Network of the DRM Standard for the Russian Federation," D.Sc. Thesis, MTUCI, Moscow, Russia, 2017.
- [23] S.E. Grychkin, A.M. Zakharov, O.V. Varlamov, "Method for calculating the efficiency of a PWM modulator based on GaN FET transistors," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.9, pp. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27.
- [24] V.B. Kozyrev, V.G. Lavrushenkov, V.P. Leonov, "Transistor generators of harmonic oscillations in the switching mode," Moscow: Radio and communication, 1985.
- [25] D.W. Cripe, "Improving the efficiency and reliability of AM broadcast transmitters through class-E power / Broadcast Electronics," URL: <https://bh.hallikainen.org/uploads/BeAmClassE.pdf>, Date of access: 25.10.2024.
- [26] S.A. Hetzel, A. Bateman, J.P. McGeehan, "Linc transmitter," *Electronics letters*. 9th May 1991. Vol. 27, no. 10, pp. 133-137.
- [27] A.S. Alipov, "Research and development of switching power amplifiers for a high-efficiency MF transmitter of digital radio broadcasting," Ph.D. Thesis / Moscow Technical University of Communications and Informatics. Moscow, 2006.

Information about authors:

Ngo Quoc Fung, post-graduate student of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Nikolay S. Bekushev, post-graduate student of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Viktor N. Gromorushkin, PhD, Senior Researcher, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Oleg V. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ В ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ НА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕМ ТЕЛЕ С КУСОЧНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-15-22

Manuscript received 24 Decemberr 2024;

Accepted 21 January 2025

Демин Дмитрий Борисович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, d.b.demin@mtuci.ru

Ключевые слова: диаграмма рассеяния, метод диаграммных уравнений, метод Т-матриц, краевое условие Дирихле, краевое условие Неймана, прямоугольник со скруглениями, треугольник со скруглениями, овал Кассини, оптическая теорема

Данная работа посвящена исследованию характеристик рассеяния телами, представляющими собой бесконечный цилиндр произвольного сечения, на границе которого выполняются идеальные краевые условия. Выбор таких рассеивателей сводит решение исходной краевой задачи к двумерной задаче дифракции. При этом граница рассеивателя представляет собой плоский контур. В качестве основных геометрий рассматривались тела с кусочно-аналитической границей, а именно: прямоугольник и конус со скруглениями. Полученные характеристики рассеяния для таких геометрий сравнивались с теми, которые были получены для аналитических контуров: суперэллипс и овал Кассини. Цель работы – продемонстрировать корректность и точность использования известного численного метода решения задач дифракции и рассеяния волн – метода диаграммных уравнений (МДУ), для вычисления характеристик рассеяния тел с кусочно-аналитической границей. Рассматривалась двумерная задача дифракции на телах с идеальными краевыми условиями (условия Дирихле и Неймана). При помощи численного алгоритма МДУ были получены характеристики рассеяния для таких геометрий тел с кусочно-аналитической границей как: прямоугольник со скруглениями и конус со скруглениями. Для подтверждения точности результаты расчета для прямоугольника со скруглениями сравнивались с расчетами, полученными для аналитической геометрии, а именно, для овала Кассини. Также проводились сравнения вычислений, полученных другими численными методами (метод Т-матриц и метод моментов). Для всех численных расчетов проводилась проверка оптической теоремы.

Информация об авторе:

Демин Дмитрий Борисович, доцент кафедры "теории вероятностей и прикладной математики", к.ф.-м.н., доцент, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

Демин Д.Б. Исследование характеристик рассеяния в двумерной задаче дифракции на идеально проводящем теле с кусочно-аналитической границей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 15-22.

For citation:

D. B. Demin, "Study of scattering characteristics in a two-dimensional diffraction problem on a perfectly conducting body with a piecewise analytic boundary," T-Comm, 2025, vol. 19, no.2, pp. 15-22. (in Russian)

Введение

Данная работа посвящена исследованию характеристик рассеяния телами, представляющими собой бесконечный цилиндр произвольного сечения, на границе которого выполняются идеальные краевые условия (рис. 1). Выбор таких рассеивателей сводит решение исходной краевой задачи к двумерной задаче дифракции. При этом граница рассеивателя представляет собой плоский контур. В качестве основных геометрий рассматривались тела с кусочно-аналитической границей, а именно: прямоугольник и конус со скруглениями (см. рис. 2). Полученные характеристики рассеяния для таких геометрий сравнивались с теми, которые были получены для аналитических контуров: суперэллипс и овал Кассини.

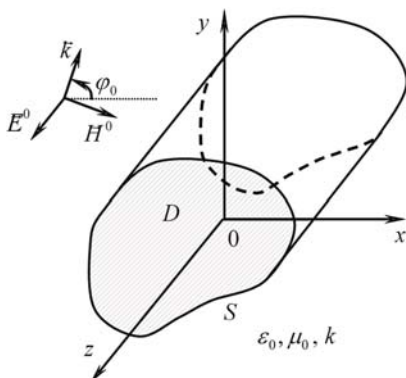


Рис. 1. Геометрия задачи (случай E поляризации)

Это сравнение достигалось тем, что размеры тел с кусочно-аналитической границей подбирались так, чтобы эти тела были как бы вписанными или близкими по форме к телам с аналитической границей.

При рассмотрении тел, чьи размеры соизмеримы с длиной волны падающего поля, чаще всего используют численные методы. Наиболее известные из них это методы интегральных уравнений. К ним относятся метод моментов, метод конечных элементов, метод Т-матриц (МТМ) и др. При рассмотрении тел больших размеров (по отношению к длине волны падающего поля) в основном используют асимптотические методы, такие как: методы физической и геометрической оптики и различные модификации указанных выше численных методов.

Для решения поставленной задачи применялся метод диаграммных уравнений (МДУ). МДУ – это универсальный численно-аналитический метод, позволяющий решать любую задачу дифракции и рассеяния волн как в двумерном, так и в трехмерном случае. Обоснование этого метода впервые было опубликовано в [1], где приведен алгоритм МДУ для решения двумерной задачи дифракции на импедансном теле. МДУ также относится к методам интегральных уравнений, но, в отличие от большинства численных методов, искомой характеристикой в нем является не волновое поле или токовая характеристика, а диаграмма рассеяния, отсюда и название этого метода.

Как было показано ранее, МДУ можно применять к телам различной геометрии как больших (несколько длин волн падающего поля), так и малых размеров (для этого были получены различные его модификации), с любыми краевыми условиями на границе (поверхности) тела [2-4]. Этот метод, в

отличии от большинства других численных методов, имеет строгое математическое обоснование и условия применимости, которые, в случае двумерной задачи дифракции, приведены в [1-2]. Численные исследования алгоритма МДУ для двумерных импедансных тел (частным случаем которых являются идеально проводящие тела) и его сравнение с методом Т-матриц, приведены в [5]. Так было доказано, что численный алгоритм МДУ устойчив для всех так называемых слабо невыпуклых тел, к каковым относятся и все выпуклые тела. Что отличает его от метода Т-матриц, который применим в основном к так называемым рэлеевским телам (смысл этого понятия подробно приведен в [2, 5]). Класс слабо невыпуклых тел гораздо шире класса рэлеевских тел. При этом МДУ вполне пригоден для тел с кусочно-аналитической границей и другими неровностями, что было продемонстрировано в работе [6], в которой рассматривалась более сложная трехмерная векторная задача дифракции. Тела с изломами границы всегда можно представить в виде их модели с кусочно-аналитической границей, т.е. когда углы и острые неровности округляются или сглаживаются.

В работе показано сравнение диаграмм рассеяния, вычисленных при помощи алгоритма МДУ, с теми, которые были получены другими методами (методом Т-матриц, методом моментов). Для обоснования сходимости численного алгоритма МДУ, помимо сравнения диаграмм рассеяния, проводилась проверка оптической теоремы.

Постановка задачи

Рассмотрим двумерную задачу дифракции, случай E поляризации, когда вектор электрической напряженности $\vec{E}(\vec{r})$ имеет единственную составляющую, параллельную оси симметрии Oz (бесконечного) цилиндрического тела с гладкой направляющей S (см. рис. 1). Введем обозначение:

$$\vec{E}(\vec{r}) = u(\vec{r}) \cdot \vec{i}_z, \tag{1}$$

где $u(\vec{r}) = u = u^0 + u^1$ – полное (скалярное или акустическое) поле вне цилиндрического тела (т.е., вне границы S). Здесь u^0 – первичное (падающее) поле, а u^1 – вторичное (рассеянное или дифракционное) поле, которое, как известно, всюду вне S удовлетворяет однородному волновому уравнению Гельмгольца

$$\Delta u^1 + k^2 u^1 = 0, \tag{2}$$

где $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – волновое число во внешней среде, и условию излучения Зоммерфельда на бесконечности, имеющее следующий вид в двумерном случае:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial u^1}{\partial r} + iku^1 \right) = 0, \tag{3}$$

где r – длина радиус-вектора \vec{r} точки наблюдения.

Будем рассматривать два случая краевых условий на границе S, а именно: условие Дирихле (мягкое краевое условие) вида:

$$u|_S = 0, \tag{4}$$

и условие Неймана (жесткое краевое условие) вида:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_S = 0. \quad (5)$$

В соотношении (5) $\frac{\partial}{\partial n}$ обозначает производную по направлению, которая берется вдоль плоского вектора внешней нормали \vec{n} к контуру S .

Математическая формулировка МДУ

Будем следовать работе [1]. Основу МДУ составляет сведение исходной краевой задачи (здесь 2-5) для уравнения Гельмгольца к интегро-алгебраическому уравнению (интегральному уравнению II рода) относительно диаграммы рассеяния (т.е. спектральной функции волнового поля), определяющей рассеянное поле в дальней зоне.

Всюду в $R^2 \setminus \bar{B}_0$ (где \bar{B}_0 – выпуклая оболочка особенностей продолжения поля u^1 внутрь рассеивателя, $\bar{B}_0 \subseteq \bar{D}$, D – область внутри границы S) рассеянное поле $u^1(r, \varphi)$ (здесь и далее r, φ – полярные координаты точки) представимо следующим интегралом плоских волн (интегралом Зоммерфельда):

$$u^1(r, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2-i\infty}^{\pi/2+i\infty} g(\varphi + \psi) \exp(-ikr \cos \psi) d\psi, \quad (6)$$

где $g(\varphi)$ – диаграмма рассеяния волнового поля u^1 , связанная с ним асимптотическим равенством

$$u^1(r, \varphi) = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} \cdot \exp\left(-ikr + i\frac{\pi}{4}\right) \cdot g(\varphi) + O\left(\frac{1}{(kr)^{3/2}}\right), \quad kr \rightarrow \infty. \quad (7)$$

Множество \bar{B}_0 полностью определяется видом диаграммы $g(\varphi)$.

Воспользуемся волновым соотношением Грина для поля u^1 :

$$u^1(\vec{r}) = \frac{i}{4} \int_S \left(\frac{\partial u}{\partial n'} - u \frac{\partial}{\partial n'} \right) H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) ds', \quad (8)$$

в котором функция $H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|)$ есть функция Грина для двумерного случая, представляющая собой цилиндрическую функцию Ганкеля второго рода и нулевого порядка.

Дальнейшая наша цель состоит в том, чтобы свести соотношение (8) к алгебраической системе МДУ. Для этого существует два основных способа. Первый состоит в алгебраизации интегрального уравнения относительно диаграммы рассеяния. Покажем это.

Подставляя в (8) соотношение (7), используя асимптотику функции $H_0^{(2)}$ (см. [1-2]) и формулы

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{1}{\sqrt{\rho^2(\varphi) + \rho'^2(\varphi)}} \left(\rho(\varphi) \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\rho'(\varphi)}{\rho(\varphi)} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right),$$

$$ds = \sqrt{\rho^2(\varphi) + \rho'^2(\varphi)} d\varphi,$$

получим следующее интегральное уравнение II рода для диаграммы рассеяния:

$$g(\alpha) = g^0(\alpha) + \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2-i\infty}^{\pi/2+i\infty} \frac{k}{4} \times \exp(-ik\rho(\varphi)(\cos \psi - \cos(\alpha - \varphi))) d\psi d\varphi \quad (9)$$

в котором

$$g^0(\alpha) = \int_0^{2\pi} v^0(\varphi) \exp(ik\rho(\varphi)\cos(\alpha - \varphi)) d\varphi. \quad (10)$$

Здесь и далее $\rho = \rho(\varphi)$ – уравнение контура S в полярных координатах.

Вид функции $v^0(\varphi)$ в (10) полностью определяется через краевое условие. Именно, в случае краевого условия (4):

$$v^0(\varphi) = \frac{i}{4} \left(\rho(\varphi) \frac{\partial u^0}{\partial r} - \frac{\rho'(\varphi)}{\rho(\varphi)} \frac{\partial u^0}{\partial \varphi} \right), \quad (11a)$$

а в случае краевого условия (5):

$$v^0(\varphi) = \frac{k}{4} u^0 [\rho(\varphi) \cos(\alpha - \varphi) - \rho'(\varphi) \sin(\alpha - \varphi)]. \quad (11b)$$

Подставляя в (9) разложения функций $g(\alpha)$ и $g^0(\alpha)$ в ряды Фурье вида:

$$g(\varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m i^m e^{im\varphi}, \quad g^0(\varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m^0 i^m e^{im\varphi}, \quad (12)$$

придем к требуемой алгебраической системе уравнений МДУ:

$$c_m = c_m^0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} G_{mn} c_n, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (13)$$

искомыми величинами в которой являются коэффициенты c_m разложения диаграммы рассеяния $g(\varphi)$ в ряд Фурье (см. (12)).

Второй способ алгебраизации состоит в следующем. В этом способе не используется интегральное уравнение (9)-(10), а используется только соотношение (8) и разложение дифракционного поля u^1 в ряд Фурье (по аналогии с разложением диаграммы рассеяния) вида:

$$u^1(r, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(kr) e^{in\varphi}, \quad (14)$$

в котором $H_n^{(2)}(kr)$ – цилиндрические функции Ганкеля 2-го рода и n -го порядка.

Подставляя, далее, ряд (14) в (8) с учетом краевого условия (4) или (5) и с использованием разложения функции $H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|)$ в аналогичный ряд Фурье вида

$$H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr') H_n^{(2)}(kr) e^{in(\varphi - \varphi')}, \quad (r > r_1 = \max_{\varphi} \rho(\varphi)), \quad (15)$$

придем к аналогичной системе уравнений МДУ вида (13), матричные коэффициенты G_{mn} в которой в случае краевого условия Дирихле (4):

$$G_{mn} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \left(ik\rho(\phi)H_n^{(2)}(k\rho(\phi)) + n \frac{\rho'(\phi)}{\rho(\phi)} H_n^{(2)}(k\rho(\phi)) \right) \times (16a)$$

$$\times J_m(k\rho(\phi)) e^{i(n-m)\phi} d\phi$$

а в случае краевого условия Неймана (5):

$$G_{mn} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} H_n^{(2)}(k\rho(\phi)) \times (16b)$$

$$\times \left(-ik\rho(\phi)J'_m(k\rho(\phi)) + m \frac{\rho'(\phi)}{\rho(\phi)} J_m(k\rho(\phi)) \right) e^{i(n-m)\phi} d\phi.$$

В формулах (16a) и (16b) величины $J_m(k\rho(\phi))$ обозначают цилиндрические функции Бесселя m -го порядка.

Коэффициенты c_m^0 правой части системы МДУ (13) имеют следующий вид:

в случае краевого условия Дирихле (4):

$$c_m^0 = \int_0^{2\pi} v^0(\phi) J_m(k\rho(\phi)) \exp(-im\phi) d\phi, (17a)$$

а в случае краевого условия Неймана (5):

$$c_m^0 = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} u^0 \left(-ik\rho(\phi)J'_m(k\rho(\phi)) + m \frac{\rho'(\phi)}{\rho(\phi)} J_m(k\rho(\phi)) \right) e^{-im\phi} d\phi (17b)$$

Если первичное поле u^0 есть плоская волна, т.е.

$$u^0(r, \phi) = e^{-ikr \cos(\phi - \phi_0)},$$

где ϕ_0 – угол падения плоской волны относительно оси Ox , то в случае краевого условия Дирихле:

$$c_m^0 = \frac{k}{4} \int_0^{2\pi} [\rho(\phi) \cos(\phi - \phi_0) + \rho'(\phi) \sin(\phi - \phi_0)] J_m(k\rho(\phi)) \times (18a)$$

$$\times e^{-ik\rho(\phi) \cos(\phi - \phi_0) - im\phi} d\phi,$$

а в случае краевого условия Неймана:

$$c_m^0 = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \left(-ik\rho(\phi)J'_m(k\rho(\phi)) + m \frac{\rho'(\phi)}{\rho(\phi)} J_m(k\rho(\phi)) \right) \times (18b)$$

$$\times e^{-ikr \cos(\phi - \phi_0) - im\phi} d\phi.$$

Математическая формулировка МТМ

Изложим кратко математическую формулировку МТМ. В отличие от МДУ, исходным уравнением в этом методе является так называемое уравнение нулевого поля [5, 7-8]:

$$\frac{i}{4} \int_S \left(\frac{\partial u}{\partial n'} - u \frac{\partial}{\partial n'} \right) H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) ds' = -u^0(\vec{r}), \vec{r} \in D. (19)$$

МТМ, как и МДУ, сводит исходную краевую задачу к решению алгебраической системы уравнений относительно неизвестных коэффициентов c_n разложения рассеянного поля u^1 в ряд (14). Для вывода этой системы будет следовать работе [3]. Введем вспомогательную функцию $J(\varphi)$, которая в

случае краевого условия Дирихле определяется как: $J(\varphi) = \frac{i}{4} \frac{\partial u}{\partial n} \sqrt{\rho^2(\varphi) + \rho'^2(\varphi)}$, а в случае краевого условия

Неймана: $J(\varphi) = \frac{i}{4} u(r, \varphi)$. Положим:

$$J(\varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_m e^{im\varphi}. (20)$$

Тогда, подставляя разложение (20) в левую часть (19), а также используя разложения:

$$u^0(r, \varphi) = e^{-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(kr) e^{in(\varphi - \varphi_0)},$$

$$H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr) H_n^{(2)}(kr') e^{in(\varphi - \varphi')}, (r < \min_{\phi} \rho(\phi)),$$

получим из (19) следующую систему:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} H_{nm} b_m = a_n, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (21)$$

где

$$H_{nm} = \int_0^{2\pi} H_n^{(2)}(k\rho) e^{i(m-n)\varphi} d\varphi \text{ (для условия Дирихле), (22a)}$$

$$H_{nm} = - \int_0^{2\pi} \left(k\rho(\varphi) H_n^{(2)}(k\rho) + in \frac{\rho'(\varphi)}{\rho(\varphi)} H_n^{(2)}(k\rho) \right) e^{i(m-n)\varphi} d\varphi$$

(для условия Неймана), (22b)

$$a_n = -(-i)^n e^{-in\varphi_0}. (23)$$

Для получения второй системы МТМ, связывающей коэффициенты b_m с c_n , необходимо воспользоваться соотношением (8), которое, с учетом краевых условий (4) или (5), примет один из следующих двух видов:

$$u^1(\vec{r}) = \int_0^{2\pi} J(\varphi') H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) d\varphi' \text{ (для краевого условия}$$

Дирихле), (24a)

$$u^1(\vec{r}) = - \int_S J(\varphi') \frac{\partial}{\partial n'} H_0^{(2)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|) ds' \text{ (для краевого}$$

условия Неймана). (24b)

Далее, подставляя в одно из соотношений (24a) или (24b) разложения (14), (15) и (20), придем к системе вида:

$$c_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} Q_{nm} b_m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (25)$$

где

$$Q_{nm} = \int_0^{2\pi} J_n(k\rho) e^{i(m-n)\varphi} d\varphi \text{ (для краевого условия Дирихле),}$$

(26a)

$$Q_{nm} = - \int_0^{2\pi} \left(k\rho(\varphi) J'_n(k\rho) + in \frac{\rho'(\varphi)}{\rho(\varphi)} J_n(k\rho) \right) e^{i(m-n)\varphi} d\varphi$$

(для краевого условия Неймана). (26b)

В матричных обозначениях алгебраические системы МТМ можно записать следующим образом:

$$H\bar{b} = \bar{a}, \quad \bar{c} = Q\bar{b}. \quad (27)$$

В результате из (27) придем к

$$\bar{c} = Q\bar{b} = QH^{-1}\bar{a} = T\bar{a}, \quad (27a)$$

где $T = QH^{-1}$ является так называемой Т-матрицей (матрицей перехода от одной системы к другой). Отсюда произошло и название самого метода.

Численные результаты

При численной реализации приведенного выше алгоритма МДУ рассматривалась конечная алгебраическая система уравнений вида:

$$c_m = c_m^0 + \sum_{n=-N}^N G_{mn} c_n, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N, \quad (13a)$$

в которой число N есть наибольшее число гармоник при разложении диаграммы рассеяния $g(\varphi)$ в ряд (13). Аналогичная ситуация будет и в МТМ: каждая из систем (21) и (25) будет рассматриваться как конечная с тем же размером матриц, что и в МДУ, поэтому число N будет также обозначать и наибольшее число гармоник в численном алгоритме МТМ.

В качестве геометрий сечений бесконечного цилиндра с кусочно-аналитической границей были выбраны такие геометрии как: прямоугольник со скруглениями (рис. 2а) и треугольник со скруглениями (рис.2б). Параметры прямоугольника со скруглениями следующие: a – радиусы верхнего и нижнего полуокругов, h – расстояние между центрами двух полуокружностей (т.е. высота прямоугольной части). Геометрия треугольника со скруглениями имеет следующие параметры: a_1 и a_2 – радиусы верхнего и нижнего полуокругов, h – расстояние между центрами двух круговых частей.

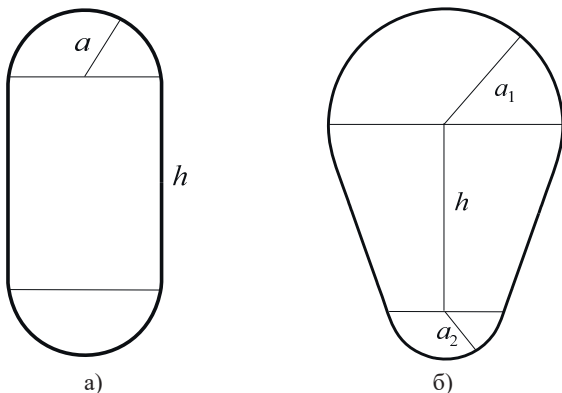


Рис. 2. Геометрии тел с кусочно-аналитической границей

Остановимся теперь на результатах расчета характеристик рассеяния для указанных выше геометрий тел. Выберем размеры прямоугольника и треугольника со скруглениями аналогичными тем, что в работах [9] и [10]. Именно, для прямоугольника со скруглениями были выбраны размеры $a = 1, h = 5$ (см. [8]), а для треугольника со скруглениями: $a_1 = 3, a_2 = 1, h = 5$ (см. [9]).

На рисунке 3-6 приведены диаграммы рассеяния выбранных тел с учетом краевых условий Дирихле и Неймана. При этом рисунки 3б-6б показывают диаграммы рассеяния, полученные при помощи МДУ (при числе гармоник $N = 20$), а рис.3а-6а – это результаты, взятые из [9] и [10]. Аналогичные диаграммы рассеяния, полученные при помощи указанного в работе численного алгоритма МТМ, полностью совпали с теми, что получались при помощи МДУ. Отметим, что угол падения плоской волны в работах [9, 10] отличается от угла падения в нашем случае на 270° . Кроме этого, диаграммы рассеяния, приведенные на рисунке 3-4, нормированы.

Сравнивая наши диаграммы рассеяния с диаграммами из работ [9, 10], видим полное совпадение с синей кривой (кривая 1), которая соответствует методу моментов, выбранного в качестве эталонного в этих работах. Остальные кривые на рисунке 3а-6а соответствуют: гибриднему методу с учетом взаимодействия (кривая 2), гибриднему методу без взаимодействия (кривая 3) и физико-оптическому приближению (кривая 4).

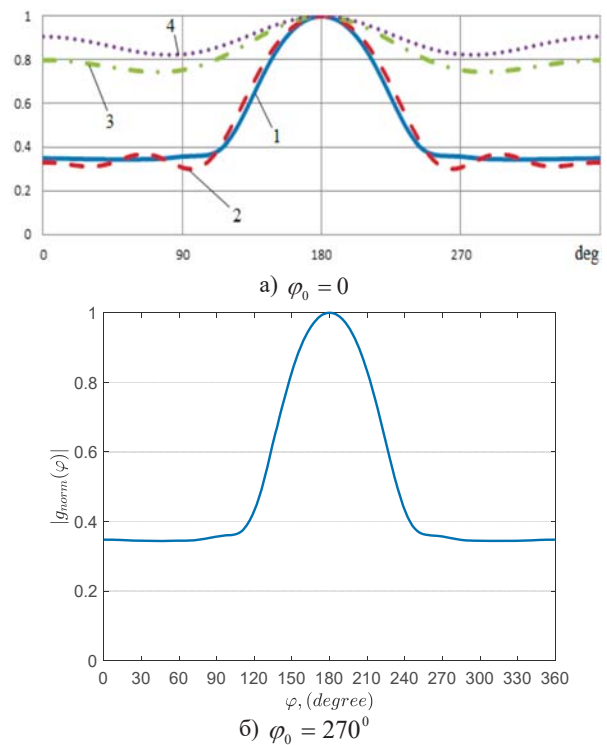
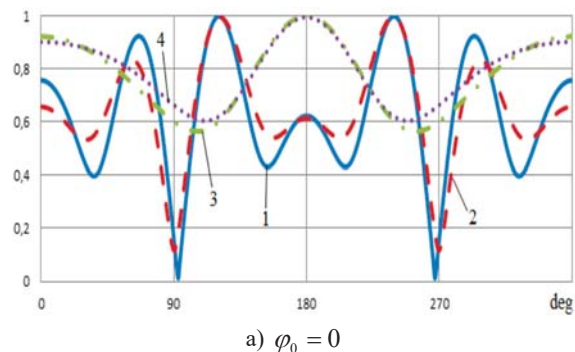
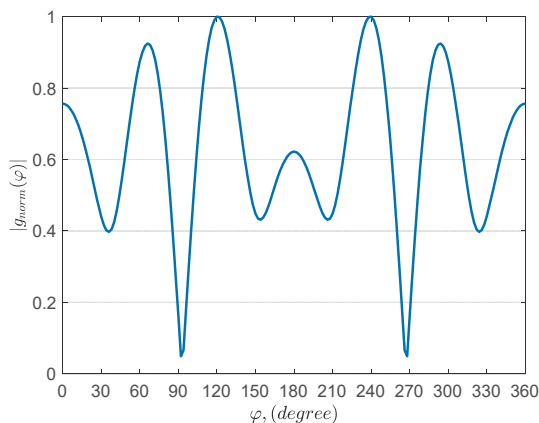


Рис. 3. Диаграмма рассеяния прямоугольника со скруглениями: $a = 1, h = 5$ (краевое условие Дирихле)

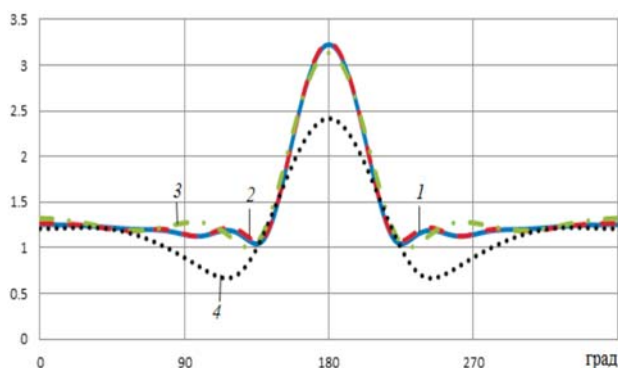




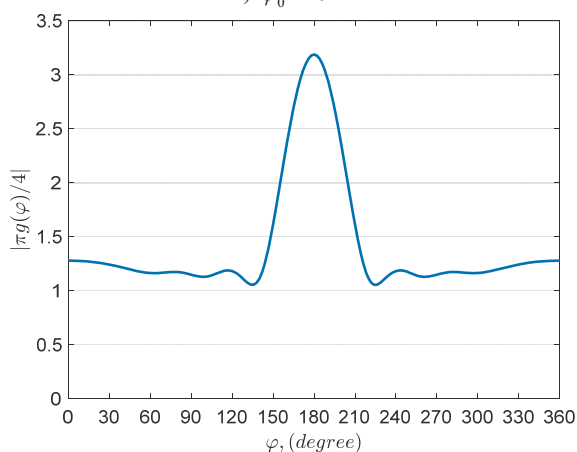
б) $\varphi_0 = 270^\circ$

Рис. 4. Диаграмма рассеяния прямоугольника со скруглениями: $a = 1, h = 5$ (краевое условие Неймана)

Для проверки сходимости численных алгоритмов МДУ и МТМ была использована оптическая теорема, согласно которой в двумерном случае в отсутствии поглощения (что соответствует крайевым условиям Дирихле и Неймана) полный поперечник рассеяния σ_s равен со знаком минус значению действительной части диаграммы рассеяния в направлении падения плоской волны [8].

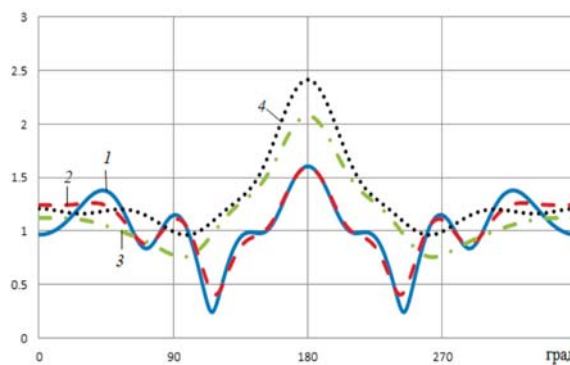


а) $\varphi_0 = 0$

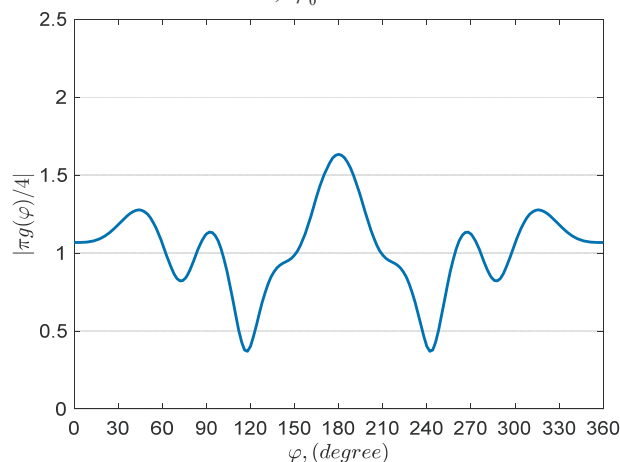


б) $\varphi_0 = 270^\circ$

Рис. 5. Диаграмма рассеяния треугольника со скруглениями: $a_1 = 3, a_2 = 1, h = 5$ (краевое условие Дирихле)



а) $\varphi_0 = 0$



б) $\varphi_0 = 270^\circ$

Рис. 6. Диаграмма рассеяния треугольника со скруглениями: $a_1 = 3, a_2 = 1, h = 5$ (краевое условие Неймана)

Именно:

$$\sigma_s = -\frac{4 \operatorname{Re} g(\varphi_0)}{k}, \quad (28)$$

где

$$\sigma_s = \frac{2}{k\pi} \int_0^{2\pi} |g(\varphi)|^2 d\varphi = \frac{4}{k} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2. \quad (29)$$

В таблицах 1-2 показаны значения полного поперечника рассеяния σ_s и абсолютная погрешность Δ выполнения оптической теоремы:

$$\Delta = \left| \sigma_s + \frac{4 \operatorname{Re} g(\varphi_0)}{k} \right|, \quad (30)$$

полученные при помощи численных алгоритмов МДУ и МТМ.

Таблица 1

Прямоугольник со скруглениями: $a = 1, h = 5, \varphi_0 = 270^\circ$ (краевое условие Дирихле)

N	МДУ		МТМ	
	σ_s	Δ	σ_s	Δ
15	9.482400	0.098522	9.864834	0.373601
20	9.253553	0.026102	9.338639	0.047284
25	9.383608	0.049836	9.242560	0.105894
28	9.346772	0.025587	172.839336	166.398654

Таблица 2

Треугольник со скруглениями $a_1 = 3, a_2 = 1, h = 5,$
 $\varphi_0 = 270^\circ$ (краевое условие Дирихле)

N	МДУ		МТМ	
	σ_s	Δ	σ_s	Δ
15	14.631625	0.076355	14.985799	0.000915
20	15.221027	0.191279	14.979994	0.004335
25	14.718018	0.045990	14.982531	0.000574
30	14.948819	0.003591	14.982264	0.000316

Анализ таблиц 1-2 показывает хорошую сходимость численного алгоритма МДУ для всех рассмотренных геометрий. Так, уже при числе гармоник N примерно равным $2 \div 3kd$ (где d – характерный размер или диаметр рассматриваемого тела), наблюдается сходимость оптической теоремы в 1-2 знаках после запятой. Точность численного алгоритма МТМ для треугольника со скруглением оказалась выше, чем в МДУ, но для прямоугольника со скруглением с ростом N наблюдается ухудшение сходимости МТМ, так как данная геометрия не удовлетворяет гипотезе Рэлея. Это еще раз подтверждает тот факт, что МТМ хорошо применим и показывает высокую сходимость для рэлеевских геометрий [2], но не применим либо имеет плохую сходимость для нерэлеевских рассеивателей. Например, эллипс будет рэлеевской геометрией при выполнении соотношения $a/b < \sqrt{2}$, где a – большая полуось, а b – малая полуось эллипса. Если вписать в наш прямоугольник со скруглениями эллипс соответствующего размера, то это и приведет к тому, что было сказано выше, а именно, что эта геометрия не будет удовлетворять гипотезе Рэлея.

В качестве следующего примера рассматривалось сравнение характеристик рассеяния, вычисленных для прямоугольника со скруглениями, с такой геометрией как овал Кассини. Уравнение овала Кассини с параметрами a и ε в полярной системе координат имеет вид:

$$\rho(\varphi) = a \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cos^2\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)}, \quad \varepsilon < 1,$$

где ε – коэффициент скругления. Чем ближе ε к единице, тем меньше овал Кассини похож на эллипс. На рисунке 7 приведено сравнение геометрий прямоугольника со скруглениями и овала Кассини при следующих параметрах: $a = 4,$ $\varepsilon = 0.99$ (овал Кассини) и $a = 4, h = 3.25$ (прямоугольник со скруглениями).

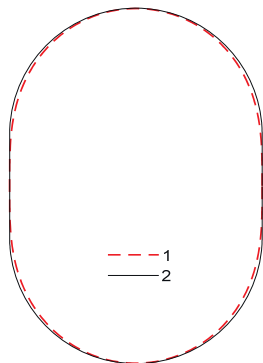
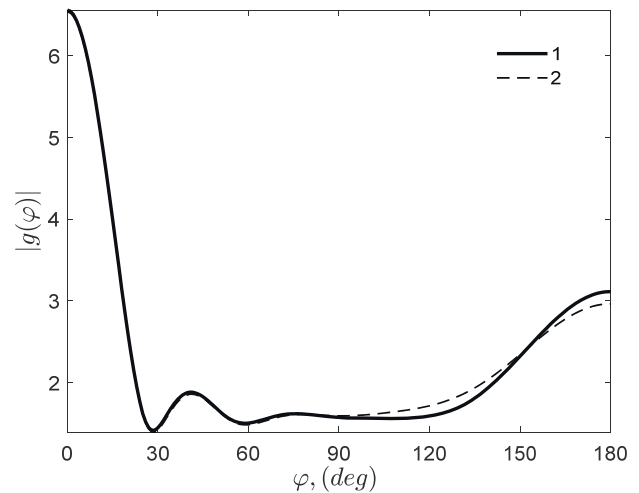


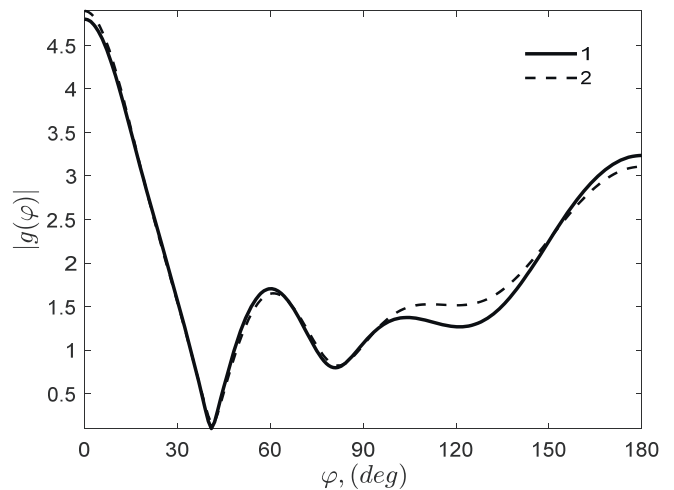
Рис. 7. Линия 1 – овал Кассини; линия 2 – прямоугольник со скруглениями

Как видно из рисунка 7 при заданных параметрах обе геометрии очень близки, что позволяет сравнить их характеристики рассеяния.

На рисунке 8а,б приведены диаграммы рассеяния для прямоугольника со скруглениями и овала Кассини с указанными выше параметрами при падении плоской волны под углом $\varphi_0 = 0^\circ$ и при $N = 20$. Рисунок 8а соответствует краевому условию Дирихле, а рисунок 8б – краевому условию Неймана. В таблицах 3 и 4 приведена величина поперечника рассеяния σ_s и проверка оптической теоремы при различных N для указанных выше геометрий тел при краевом условии Неймана.



а) условие Дирихле



б) условие Неймана

Рис. 8. Диаграммы рассеяния прямоугольника со скруглениями (линия 1) и овала Кассини (линия 2)

Таблица 3

Прямоугольник со скруглениями $a = 4, h = 3,25, \varphi_0 = 0^\circ$
 (краевое условие Неймана)

N	МДУ		МТМ	
	σ_s	Δ	σ_s	Δ
18	18.87897934	0.0003521	18.87824814	1.33×10^{-5}
20	18.87844157	8.12×10^{-5}	18.87824860	6.44×10^{-6}
22	18.87826434	5.6×10^{-6}	18.87824534	4.74×10^{-6}

Овал Кассини $a = 4$, $\varepsilon = 0,99$, $\varphi_0 = 0^\circ$
(краевое условие Неймана)

N	МДУ		МТМ	
	σ_s	Δ	σ_s	Δ
18	19.25527985	0.0005985	19.256485629952	1.88×10^{-8}
20	19.25678052	0.0001466	19.256485674589	8.53×10^{-10}
22	19.25641588	3.47×10^{-5}	19.256485675809	4.51×10^{-12}

Из рисунка 8а,б и таблиц 3-4 видно хорошее совпадение диаграмм рассеяния и поперечников рассеяния для обеих геометрий, что позволяет использовать аналитическую границу, а именно, овал Кассини, в качестве приближения кусочно-аналитической границы.

Проведенные вычисления характеристик рассеяния на телах с кусочно-аналитической границей и размерами, сопоставимыми с длиной волны падающего поля, показали хорошую сходимость и устойчивость численного алгоритма МДУ, и его применимость к таким геометриям. Результаты, полученные при помощи МДУ, совпали с теми, что были получены методом моментов в работах [9]-[10]. МТМ продемонстрировал высокую сходимость в основном для всех рэлеевских геометрий тел, к каковым в данной работе можно отнести треугольник со скруглениями, а также особый случай прямоугольника со скруглениями, в который можно вписать овал Кассини. В остальных случаях численный алгоритм МТМ с ростом числа гармоник N приводит к росту погрешности вычислений.

1. Кюркчан А.Г. Об одном новом интегральном уравнении в теории дифракции. ДАН, 1992. С. 273-279.
2. Кюркчан А.Г., Смирнова Н.И., Клеев А.И. Методы решения задач дифракции, основанные на использовании априорной аналитической информации. М.: Физматлит, 2022. 312 с.
3. Демин Д.Б., Клеев А.И., Кюркчан А.Г. Использование метода диаграммных уравнений для анализа рассеяния на малых частицах сложной формы // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. № 10, 2016. С. 38-42.
4. Demin D.B., Kleev A.I., Kyurkchan A.G. Modeling of Electromagnetic Scattering by Thin Cylinders Using Pattern Equation Method // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. Т. 187. С. 287-292.
5. Демин Д.Б., Кюркчан А.Г., Смирнова Н.И. Усреднение по углам облучения в двумерной скалярной задаче дифракции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, № 11, 2012. С. 15-21.
6. Kyurkchan A.G., Demin D.B. Electromagnetic wave diffraction from impedance scatterers with piecewise-smooth boundaries // Journal of Commun. Techn. and Electron. Vol 47. № 8, 2002, pp. 856-63.
7. Waterman P.C. New formulation of acoustic scattering // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. Vol. 45, pp. 1417-1429.
8. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989.
9. Калошин В.А., Луу Д.Т. Рассеяние плоской волны на цилиндре с кусочно-аналитической формой сечения // Радиотехника и электроника, Т. 65. № 5, 2020. С. 457-463.
10. Kaloshin V.A., Luu D.T. Plane Wave Scattering on Ideally Conductive Plate with Rounded Edges // Proc. Of IEEE Int. Conf. «2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)», Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. 2019, pp. 232-235.

STUDY OF SCATTERING CHARACTERISTICS IN A TWO-DIMENSIONAL DIFFRACTION PROBLEM ON A PERFECTLY CONDUCTING BODY WITH A PIECEWISE ANALYTIC BOUNDARY

Dmitry B. Demin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, d.b.demin@mtuci.ru

Abstract

The purpose of this work was to demonstrate correctness and accuracy of use of a well-known method of solving diffraction and wave scattering problems – the Pattern Equation Method (PEM), for calculation of scattering characteristics of bodies with a piecewise analytic boundary. A two-dimensional problem of diffraction on bodies with perfect boundary conditions (Dirichlet and Neumann conditions) was considered. Using a numeric technique of PEM, scattering characteristics were obtained for such geometries of bodies with piecewise analytic boundaries as a rectangle with roundings and a triangle with roundings. For accuracy verification, the calculation results for the rectangle with roundings were compared with the calculations obtained for analytical geometry, namely, for Cassini oval. Besides, calculations obtained with other numerical methods were compared (T-matrix method and method of moments). For all numerical calculations, the optical theorem was verified.

Keywords: Scattering pattern, Pattern Equation Method, T-matrix Method, Dirichlet boundary condition, Neumann boundary condition, Rectangle with roundings, Triangle with roundings, Cassini oval, Optical theorem.

References

- [1] A.G. Kyurkchan, "A new integral equation in the diffraction theory," *Soviet Physics-Doklady*, 1992, vol. 37, no 7, pp. 338-340.
- [2] A.G. Kyurkchan, N.I. Smirnova, A.I. Kleev, "Methods for solving diffraction problems based on the use of a priori analytical information," Moscow: Fizmatlit, 2022, 312 p. (in Russian)
- [3] D.B. Demin, A.I. Kleev, A.G. Kyurkchan, "The Applying of the Pattern Equation Method for the Analysis of Scattering by Small Particles of the Complicated Shape," *T-Comm*, no. 10, 2016, pp. 38-42. (in Russian)
- [4] D.B. Demin, A.I. Kleev, A.G. Kyurkchan, "Modeling of Electromagnetic Scattering by Thin Cylinders Using Pattern Equation Method," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. Vol. 187, pp. 287-292.
- [5] D.B. Demin, A.G. Kyurkchan, N.I. Smirnova, "Averaging of scattering characteristics in a 2D diffraction problem," *T-Comm*, no. 11, 2012, pp.15-21. (in Russian)
- [6] A.G. Kyurkchan, D.B. Demin, "Electromagnetic wave diffraction from impedance scatterers with piecewise-smooth boundaries," *Journal of Commun. Techn. and Electron*. Vol 47, no. 8, 2002, pp. 856-63.
- [7] P.C. Waterman, "New formulation of acoustic scattering," *J. Acoust. Soc. Amer.* 1969. Vol. 45, pp. 1417-1429.
- [8] E.L. Shenderov, "Radiation and scattering of sound., L.: Shipbuilding, 1989. (in Russian)
- [9] V.A. Kaloshin, D.T. Luu, "Scattering of a Plane Wave by a Cylinder with a Piecewise Analytical Form of the Section," *Journal of Commun. Techn. and Electron.*, Vol. 65, No. 5, 2020, pp. 495-501.
- [10] V.A. Kaloshin, D.T. Luu, "Plane Wave Scattering on Ideally Conductive Plate with Rounded Edges," *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. 2019, pp. 232-235.

Information about author: Dmitry B. Demin, Associate Professor, Cand. Sc., Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДА ЦИФРОВОЙ ГОЛОСОВОЙ РАДИОЛИНИИ ДКМВ ДИАПАЗОНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-23-30

Manuscript received 11 January 2025;
Accepted 30 January 2025

Варламов Владимир Олегович,
Московский Технический Университет Связи
и Информатики, Москва, Россия, f.vvo@bk.ru

Ключевые слова: ДКМВ диапазон, ионосферный канал, голосовые радиолнии, широкополосный сигнал, NB-LDPC код

Разработка цифровых голосовых радиолний для диапазона дециметровых длин волн, способных работать как с сигналами, распространяющимися вдоль поверхности Земли, так и с отраженными от ионосферы, является актуальной задачей. Однако, предъявляемые к таким системам требования по энергопотреблению и габаритам приводят к жестким ограничениям на энергетический бюджет. Этот факт обуславливает необходимость разработки методик определения параметров радиограммы, учитывающей требования к полезной нагрузке линии связи и результаты прогнозирования состояния канала с целью повышения помехоустойчивости радиолнии. В данной работе представлена методика, позволяющая определить соотношение между длительностью синхропоследовательности и кодового блока по критерию наибольшей совместной вероятности обнаружения последовательности синхронизации и декодирования блока данных. При этом учитывается ограничение на максимальную длительность радиограммы, что позволяет выразить искомое соотношение через скорость помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолнии. Предлагаемая методика учитывает результаты прогнозирования при распространении сигнала от передающей к приемной станции вдоль поверхности Земли, и при отражении от ионосферы в зависимости от частоты, что позволяет определить кодовую скорость, максимизирующую указанную вероятность в течение наибольшего времени.

Информация об авторе:

Варламов Владимир Олегович, ассистент кафедры "Радиотехнические системы", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1607-9166>

Для цитирования:

Варламов В.О. Методика определения скорости помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолнии ДКМВ диапазона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 23-30.

For citation:

V. O. Varlamov, "Methodology for determining the error correction code rate of the HF range digital voice radio link," T-Comm, 2025, vol. 19, no.2, pp. 23-30. (in Russian)

Введение

Диапазон декаметровых длин волн (ДКМВ) отличается возможностью создания систем связи, работающих на расстоянии, превышающем дистанцию прямой видимости, за счет эффекта отражения радиоволны от ионосферных слоев E, F1 и F2. Этот факт активно используется как при построении систем радиовещания для регионов с малой плотностью населения, что делает экономически нецелесообразным размещение большого количества маломощных вещательных станций [1-3], так и при разработке систем связи с удаленными регионами либо экспедициями.

Поскольку частотный ресурс ДКМВ диапазона строго ограничен и составляет от 3 до 30 МГц, а диапазон, пригодный для использования в системах связи, работающих в условиях отражения радиоволны под острым углом, что наблюдается при дальностях порядка 100 км, составляет только нижнюю часть всего ДКМВ диапазона от 3 МГц до 10 МГц. По этой причине задача повторного использования частотного ресурса при построении подобных систем связи является одной из приоритетных. Большинство помех в диапазоне ДКМВ представляют собой узкополосные сигналы с полосой в 10 и более раз меньшей, чем полоса сигналов, используемых в исследуемом виде радиолиний [4], за счет чего влияние таких помех может быть снижено при помощи использования устройств частотно селективной режекции помех, например, таких, как описаны в [1, 5, 6].

Использование низкоскоростных речевых кодеков, требующих пропускной способности линии связи порядка 1000 бит в секунду, позволяет реализовывать линии связи, способные работать при близких к нулю децибел отношениях сигнал шум в полосе частот сигнала. В подобных условиях построение голосовой радиолинии с использованием широкополосных шумоподобных сигналов с прямым расширением спектра требует определения параметров радиограммы, содержащей кодовый блок с полезной информацией и синхропоследовательность, необходимую для работы алгоритмов обнаружения [7,8] и оценки параметров канала [9-16] с учетом ограничений на длину кадра, накладываемых требованиями к максимально допустимой задержке в голосовых системах связи [17].

Описание модели радиолинии

Голосовая радиолиния на основе модуляции с прямым расширением спектра требует использования устройства преобразования низкочастотного речевого сигнала в битовый поток. Причем по причине малого запаса по мощности сигнала над шумом и помехами требуется выполнение данного преобразования с наименьшей требуемой скоростью передачи данных. Одними из таких устройств являются реализации алгоритма низкоскоростного речевого кодера codec2 [18].

Принцип сжатия речевого сигнала в данном семействе алгоритмов основан на определении косвенных параметров, позволяющих на приемной стороне синтезировать сигнал, обеспечивающий наибольшую разборчивость речи, которые передаются по линии связи. В набор передаваемых параметров входит частота основного тона кодируемого сигнала на заданном интервале времени, а также квантованный набор

амплитуд и фаз гармоник этого тона. Количество гармоник, о которых передается информация, а также степень сжатия определяют требуемую скорость передачи для данного режима работы и качество восстановления.

Таким образом, исходя из требований к разборчивости и качеству восстановления речевого сигнала и основываясь на наборе режимов работы данного алгоритма, требуемая информационная скорость цифрового модема радиолинии может быть определена заранее и использоваться при выборе параметров радиограммы. Для помехоустойчивого кодирования предлагается использовать недвоичный LDPC код (NB-LDPC), как было показано в [19, 20] этот помехоустойчивый кодек обеспечивает хорошие показатели помехоустойчивости при использовании с ансамблями шумоподобных сигналов. Для передачи недвоичных m -разрядных символов NB-LDPC кодера может использоваться алфавит из 2^m фазоманипулированных сигналов, сформированных на основе квазиортогональных двоичных псевдослучайных последовательностей.

На приемной стороне такое представление символов кодового блока позволяет, рассчитав корреляционные суммы для каждого из 2^m сигналов ансамбля, которые после оценки дисперсии шума на приемной стороне пересчитываются в набор апостериорных вероятностей, являющихся входными данными для NB-LDPC декодера, повысить отношение сигнал шум в 2^m раз. Но при неточной синхронизации по времени и частоте величина этого выигрыша снижается. Структурная схема описанной модели представлена на рисунке 1.

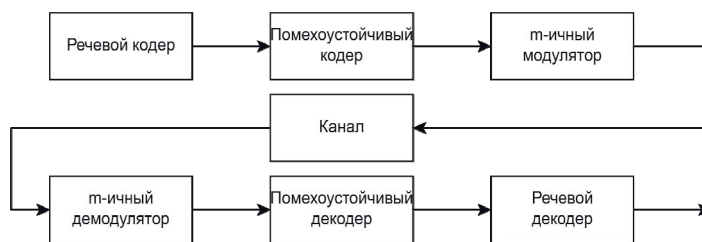


Рис. 1. Структурная схема модели исследуемой радиолинии

Однако при приеме широкополосных сигналов, проходящих через ионосферный канал, серьезное влияние на уровень корреляционных сумм, рассчитываемых на приемной стороне, оказывает частотная дисперсия этого канала, а при приеме символов с большой длительностью – неточность истинных значений частот синтезаторов несущего колебания, используемых в приемном и передающем трактах. Как было показано в [6, 7], влияние этих эффектов может быть оценено совместно с обнаружением синхропоследовательности и затем, по полученным оценкам наклона дисперсионной характеристики и величины доплеровского сдвига, эти эффекты могут быть компенсированы. По этой причине в данной работе влияние дисперсионных искажений и смещения несущей частоты относительно ожидаемой рассматриваться не будет.

Описание методики определения параметров кадра радиолинии

Для определения параметров кадра, обеспечивающих наибольшую помехоустойчивость, в качестве критерия предла-

гается использовать совместную вероятность обнаружения синхропоследовательности кадра и декодирования кодового блока этого кадра. Таким образом, принимая данные события независимыми, вероятность обнаружения и принятия информационного кадра может быть рассчитана как:

$$P_{np} = P_{обн} P_{дек} \quad (1)$$

где P_{np} – вероятность обнаружения и корректного декодирования кодового блока, $P_{обн}$ – вероятность обнаружения синхропоследовательности, $P_{дек}$ – вероятность декодирования кодового блока.

Для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), который соответствует распространению радиоволны вдоль поверхности Земли, вероятность обнаружения $P_{обнз}$ для известного сигнала синхропоследовательности с неизвестной начальной фазой может быть рассчитана согласно [21] как:

$$P_{обнз} (E_{np}/N_0) = 1 - \int_0^{\sqrt{\frac{-\ln(P_{ам})}{E_{np}/N_0}}} \frac{2\nu E_{np}}{N_0} e^{-\frac{E_{np}}{N_0}(\nu^2+1)} I_0\left(\frac{E_{np}}{N_0} 2\nu\right) d\nu \quad (2)$$

где E_{np} – энергия сигнала синхропоследовательности, $P_{ам}$ – задаваемая вероятность ложной тревоги, N_0 – спектральная плотность мощности шума, I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для канала с Рэлеевскими замираниями (соответствующего распространению радиоволны с отражением от ионосферы) вероятность обнаружения $P_{обни}$ при аналогичном случае с АБГШ алгоритме обнаружения может быть рассчитана как:

$$P_{обни} (E_{np}/N_0) = e^{-\frac{\log(P_{ам}) \frac{E_{np}}{N_0}}{E_{np} + 2E_{np}^2 \sigma_{зам}^2}} \quad (3)$$

где $\sigma_{зам}^2$ – параметр распределения Рэля. Средняя энергия сигнала с учетом замираний равна $2E_{np} \sigma_{зам}^2$.

Аналогично вероятностям обнаружения необходимо определить вероятности декодирования кодовых блоков $P_{декз}$ и $P_{декн}$ для каналов с АБГШ с замираниями соответственно. Данную задачу предлагается решать при помощи имитационного моделирования работы помехоустойчивого кодера для требуемой модели канала.

Декодирование NB-LDPC кода реализовано по алгоритму распространения доверия. Поэтому, для реализации упомянутой модели, требуется определить апостериорные вероятности приема символов кодового слова. Для помехоустойчивых кодов, работающих с символами разрядности m , вероятность приема k -го символа кодового слова c_k определяется как:

$$P(c_k/\bar{y}) = \frac{W(\bar{y}, c_k)}{W(\bar{y})} = \frac{\prod_{\substack{u=1 \\ u \neq k}}^{2^m} W(\bar{y}_u, c_k)}{\sum_{e=1}^{2^m} \left[\prod_{\substack{u=1 \\ u \neq e}}^{2^m} W(\bar{y}_u, c_e) \right] W(\bar{y}_e, c_e)} \quad (4)$$

где $\bar{y} = \{y_1, y_2, y_{2^m}\}$ – решающая статистика, получаемая с выхода коррелятора, а $W(\bar{y}_i/c_i)$ и $W_{ui}(\bar{y}_i)$ – условная функция плотности вероятности для статистики \bar{y}_i при условии передачи символа c_i и плотность вероятности шумового воздействия для статистики \bar{y}_i . Выражение (4) может быть упрощено как:

$$P(c_k/\bar{y}) = \frac{1}{\sum_{e=1}^{2^m} \left[\frac{W(\bar{y}_e/c_e)}{W_{ui}(\bar{y}_e)} \frac{W_{ui}(\bar{y}_k)}{W(\bar{y}_k/c_k)} \right]} \quad (5)$$

В таком случае для расчета апостериорных вероятностей приема k -го символа для заданного набора решающих статистик $\bar{y} = \{y_1, y_2, y_{2^m}\}$ необходимо рассчитать только плотности вероятности шумового воздействия. Подставляя в (5) аналитические выражения для плотностей вероятностей случайных процессов, используемых в моделях каналов с АБГШ и замираниями, в соответствии с [15] получаем выражение (6), описывающее вероятности приема символов кодового блока при распространении сигнала вдоль поверхности Земли и выражение (7), описывающее вероятности для случая приема сигнала, отраженного от ионосферы:

$$P(c_k/\bar{y}) = \frac{1}{\sum_{e=1}^{2^m} e^{-\frac{2E_c(y_e - y_k)^2}{2\sigma_{ш}^2}}} \quad (6)$$

$$P(c_k/\bar{y}) = \frac{1}{\sum_{l=1}^{2^m} e^{-\frac{1}{2}(|\dot{y}_k|^2 - |\dot{y}_l|^2) \frac{\sigma_{зам}^2 E_c^2}{\sigma_{ш}^2 (\sigma_{ш}^2 + \sigma_{зам}^2 E_c)}}} \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) $\sigma_{ш}^2$ означает дисперсию шума, E_c – энергию сигнала, представляющего кодовый символ, $\sigma_{зам}^2$ – параметр распределения Рэля.

Таким образом, получив решающие статистики при помощи моделей каналов, описанных в [22,23], и рассчитав апостериорные вероятности для декодера NB-LDPC кода в результате имитационного моделирования, можно получить зависимости вероятности декодирования кодового блока $P_{дек}$ от отношения E_c к N_0 для любого возможного значения кодовой скорости NB-LDPC кода r . Подставляя в выражение (1) выражения (2), (3) и (6), (7) получаем вероятности корректного приема для земной и ионосферной волны:

$$P_{npz}(E_{np}/N_0, E_c/N_0, r) = P_{обнз}(E_{np}/N_0)P_{декз}(E_c/N_0, r)$$

$$P_{npи}(E_{np}/N_0, E_c/N_0, r) = P_{обни}(E_{np}/N_0)P_{деки}(E_c/N_0, r)$$

В данных выражениях параметр E_{np} может быть выражен с помощью значений длительности информационного символа T_c , числа информационных бит в кодовом блоке K , длительности кадра $T_{кадра}$ и энергии информационного символа E_c . Так, в предположении передачи одного кодового блока в кадре E_{np} рассчитывается как произведение E_c и разности числа символов, укладываемых на длительности кадра с числом символов кодового блока.

$$E_{np} = E_c \left(\frac{T_{кадра}}{T_c} - \frac{K}{r} \right) = E_c N_{np}(r)$$

Временная структура используемого кадра с описанными выше соотношениями приведена на рисунке 2.

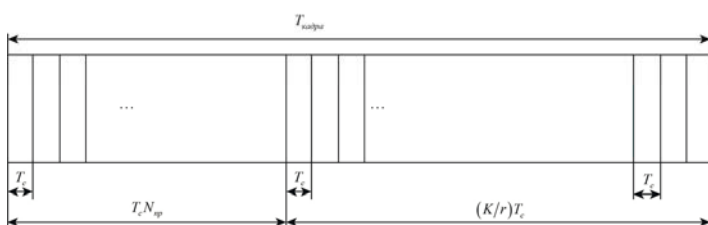


Рис. 2. Временная структура кадра радиолинии

Поскольку $T_{кадра}$, $T_c N_{np}$ и число информационных символов в кодовом блоке K определяются требованиями к радиолинии, эти параметры могут быть приняты константными, и E_{np} определяется как функция от E_c и r . В таком случае можно найти такое r , для которого вероятность P_{npz} и $P_{npи}$ будет максимальна. Поскольку в реальной системе чаще всего обрабатываться будет тот кадр, для которого вероятность обнаружения синхропоследовательности была выше, то выражения для определения r с учетом двух возможных путей распространения радиоволны будет описываться следующим образом:

$$P_{np}(E_c/N_0) = \begin{cases} \arg \max_r (P_{npz}(E_c/N_0, r)), P_{обнз}(E_c/N_0, r) > P_{обни}(E_c/N_0, r) \\ \arg \max_r (P_{npи}(E_c/N_0, r)), P_{обни}(E_c/N_0, r) > P_{обнз}(E_c/N_0, r) \end{cases} \quad (8)$$

Как было показано в [24], значение r , для которого P_{np} максимальна, зависит от соотношений E_c/N_0 как при расчете вероятности приема сигнала распространяющегося вдоль поверхности Земли, так и для сигнала отраженного от ионосферы.

Таким образом, для полного определения исходных параметров оптимизируемой функции требуется провести расчет отношений сигнал/шум на входе приемного устройства.

Определение параметров кадра радиолинии с учетом распространения радиосигнала

При распространении вдоль поверхности Земли для расчета уровня сигнала на входе приемника необходимо определить: мощность передатчика, коэффициенты усиления приемной и передающей антенн, несущую частоту. В то время как для расчета при отражении от ионосферы, помимо вышеперечисленных параметров, необходимо задать координаты точек приема и передачи, дату и время суток и индекс солнечной активности.

Зададимся следующими требованиями к радиолинии: информационная скорость голосового кодека – 2400 бит/с, длительность кадра – 100 мс (в соответствии с требованиями на максимальную задержку для голосовых линий связи [17]), скорость манипуляции псевдослучайной последовательности – 100 кбод, разрядность символов – 6, излучаемая мощность передающей станции – 50 Вт, координаты приемной и передающей станций – Московская область, приемная и передающая антенны – диполь длиной 4 метра, диапазон рабочих частот – 5-9 МГц.

Для расчета значений $P_{декз}(E_c/N_0, r)$ и $P_{деки}(E_c/N_0, r)$ был выбран диапазон кодовых скоростей от 20/21 до 1/4 (минимальная кодовая скорость, при которой длительность кодового блока не превышает $T_{кадра}$), далее были получены наборы кривых помехоустойчивости для двух рассматриваемых каналов представленных на рисунках 3 и 4.

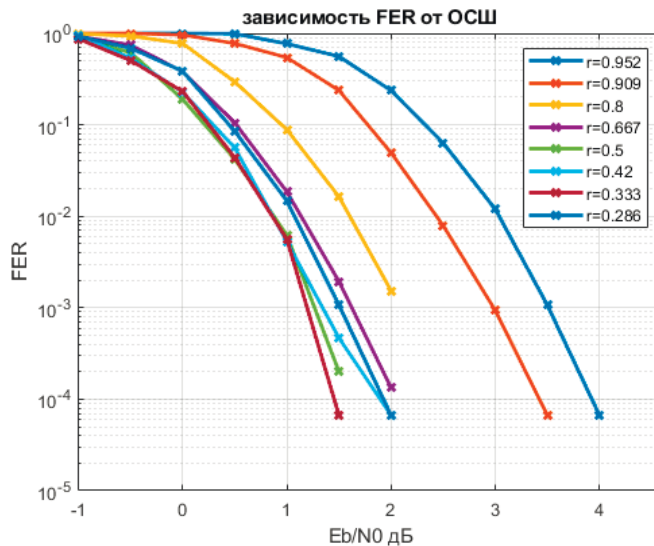


Рис. 3. Зависимость FER от ОСШ и кодовой скорости для канала АБГШ

Расчет отношения мощности сигнала к мощности шума при распространении по Земной волне производился на основе мощности полезного сигнала на входе приемного устройства, рассчитываемого в соответствии с рекомендацией МСЭ-Р Р.368-10 [25] и чувствительности приемного устройства -100 дБм. Расчет отношения мощностей сигнала и шума при отражении от ионосферы производился с помощью свободно распространяемого программного пакета, реализующего расчет в соответствии с рекомендацией МСЭ-Р Р.372-14 [26, 27].

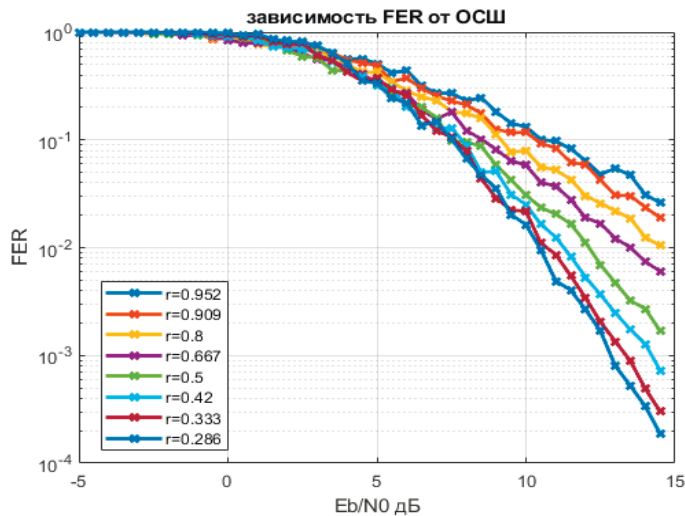


Рис. 4. Зависимость FER от ОСШ и кодовой скорости для канала Рэля

Поскольку уровень отраженного сигнала сильно зависит от концентрации электронов, которая варьируется от времени года, времени суток и солнечной активности, при расчете отношений сигнал шум для выбора параметров радиолинии требуется учитывать изменения условий распространения от этих параметров. В предлагаемой методике число Вольфа предлагается считать константным, и для дальнейшего расчета оно было выбрано равным 60, как средняя величина за последние два цикла солнечной активности. Так для заданных параметров передающей станции был рассчитан набор значений ОСШ в полосе 100 кГц (эффективная полоса сигнала по уровню 3 дБ численно равна скорости манипуляции псевдослучайной последовательности) для несущих частот из указанного диапазона с шагом 0.5 МГц, времени суток с шагом в один час, 12 месяцев.

Поскольку обе используемые методики прогнозирования распространения сигнала позволяют определить изменение напряженности электромагнитного поля в зависимости от расстояния между приемной и передающей станцией, то с использованием данных моделей можно получить значения ОСШ для перечисленных выше комбинаций условий распространения при изменении дальности, на которой работает радиолиния от 10 до 150 км с шагом 10 км.

Таким образом, было получено два набора отношений мощностей сигнала P_c к мощности шума для случая распространения: вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы ($P_{из}$ и $P_{ши}$ соответственно). $P_c/P_{из}$ и $P_c/P_{ши}$ далее будут рассматриваться в зависимости от расстояния между приемной и передающей станцией d , несущей частоты f_0 , времени суток H , месяца M и обозначаться как $P_c/P_{из}(d, f_0, H, M)$ и $P_c/P_{ши}(d, f_0, H, M)$ соответственно. Далее, подставляя эти значения в выражение (8), рассчитывается вероятность обнаружения и правильного декодирования данных информационного кадра $P_{np}(r, d, f_0, H, M)$. Срез для $f_0 = 7$ МГц, местного времени 10 часов утра и января месяца, представлен на рисунке 5.

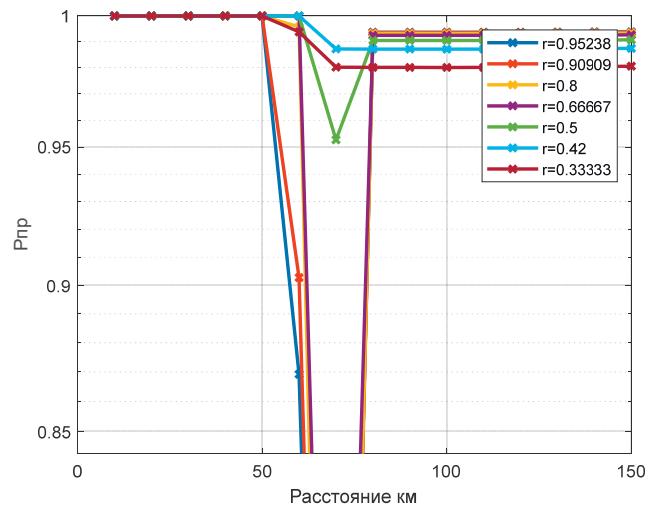


Рис. 5. Зависимость вероятности приема кодового блока от расстояния для несущей частоты 7 МГц, января месяца и 10 часов утра по местному времени

На данной зависимости можно заметить провал характерный для всех значений r , который тем сильнее проявляется, чем больше величина r (следовательно, при большей длительности синхропоследовательности), это объясняется тем фактом, что синхропоследовательность с большей длительностью обнаруживается в канале с АБГШ с более высокой вероятностью, нежели в канале с замираниями, но при таком ОСШ блок помехоустойчивого кода уже не может быть корректно декодирован. В связи с этим предлагается определять кодовую скорость, для которой величина P_{np} максимальна в худшем случае. Таким образом, r , обеспечивающее наибольшую вероятность приема из наименьших вероятностей для всего набора дальностей d для фиксированных f_0, H и M , рассчитывается как:

$$r_{max}(f_0, H, M) = \max_r \left(\min_d (P_{np}(r, d, f_0, H, M)) \right)$$

Набор значений $r_{max}(f_0, H, M)$ при f_0 равном 7 МГц представлен на рисунке 6.

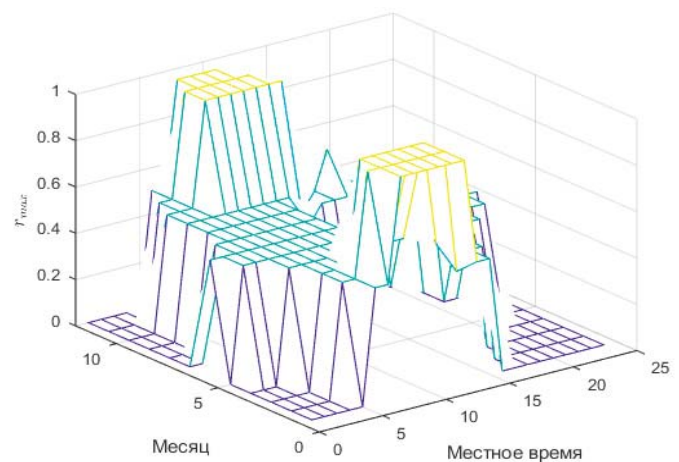


Рис. 6. Величины кодовых скоростей, обеспечивающие наибольшую вероятность приема в зависимости от месяца и времени суток для частоты 7 МГц

По значениями $r_{max}(f_0, H, M)$ может быть рассчитана доля времени $P_{r_{max}}$ в течение которого каждое из рассматриваемых значений кодовой скорости r обеспечивает наибольшую величину P_{np} , зависимость величин $P_{r_{max}}$ от частоты для каждого значения кодовой скорости представлена на рисунке 7.

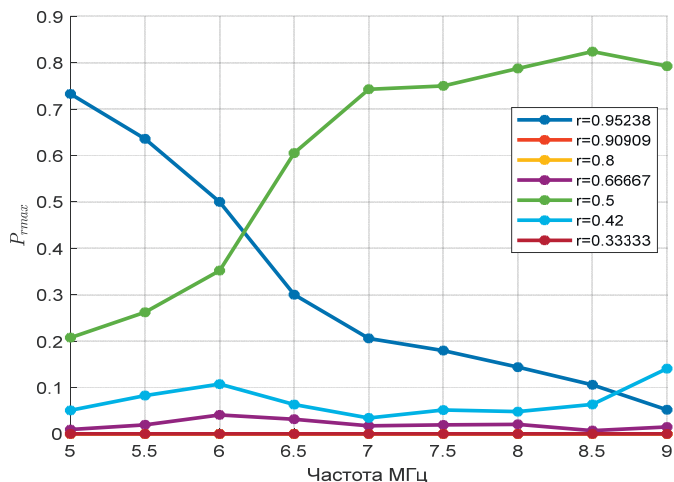


Рис. 7. Зависимость доли времени, для которой кодовая скорость r обеспечивает наибольшую вероятность приема от частоты

По данной зависимости можно наблюдать, что для рассмотренного набора параметров в течение большей доли времени максимальную величину P_{np} обеспечивают два значения $r_{max} - 1/2$ и $20/21$. Этот факт объясняется тем, что при низких частотах, заданной мощности передающей станции, коэффициентах усиления приемной и передающей антенн и базе расширяющей последовательности, отношение энергии, которое приходится на один информационный бит к мощности шума на входе декодера, достаточно для декодирования блоков без ошибок, и большой вклад в значение P_{np} вносит вероятность обнаружения. Таким образом, P_{np} растет с увеличением длины синхропоследовательности, а следовательно и с увеличением кодовой скорости, в то время как с увеличением частоты, в течение все большей доли времени, уровень сигнала, прошедшего через ионосферный канал, оказывается низким, что приводит к низкому ОСШ, которое требует большей избыточности на этапе декодирования для корректного приема кодовых блоков. Это приводит к тому, что при малых значениях r энергии синхропоследовательности недостаточно для стабильного обнаружения радиограммы, а при больших – избыточности, вносимой на этапе кодирования информационного блока, становится недостаточно для верного декодирования. Это приводит к тому, что наибольший P_{np} достигается при промежуточном значении r , равном в представленном примере 0,5. Таким образом, представленная методика позволяет осуществить выбор параметров кадра голосовой радиолнии ДКМВ диапазона ближнего радиуса действия, с учетом результатов прогнозирования качества прохождения сигнала вдоль поверхности Земли и через ионосферный канал в зависимости от используемой несущей частоты передачи, учитывая влия-

ние этих факторов на численные значения параметров радиограммы, при которых достигается наибольшая вероятность приема.

Выводы

В данной работе была представлена методика определения кодовой скорости, обеспечивающей максимальную вероятность обнаружения и декодирования информационного блока цифровой голосовой радиолнии ДКМВ диапазона. Представленная методика использует результаты предсказания параметров распространения радиоволны вдоль земной поверхности и при ее отражении от ионосферы Земли. Таким образом, было учтено влияние отношения мощности сигнала к мощности шума на соотношение энергии последовательности синхронизации и блока помехоустойчивого кода, при котором максимизируется вероятность обнаружения и декодирования упомянутого блока кода. В результате, предлагаемая методика дает возможность рассчитать зависимость доли времени от рабочей частоты, в течение которой конкретная величина кодовой скорости является наилучшей с точки зрения максимизации указанных вероятностей. Полученные зависимости позволяют выбрать кодовую скорость для проведения сеанса связи, обеспечивающую максимальный уровень вероятности обнаружения и декодирования блока помехоустойчивого кода в течение наибольшего времени для заданной рабочей частоты.

Литература

1. Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О. и др. Современные методы обработки широкополосных сигналов в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 12. С. 17-31. DOI 10.18127/j00338486-202312-03. EDN KBOHLS
2. Варламов О.В. Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации: специальность 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Варламов Олег Витальевич. Москва, 2017. 350 с. EDN ZQMQAF
3. Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В. Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 9. С. 9-16. EDN: CHEXOK
4. Kandaurov N.A., Lobova E.O., Varlamov V.O. Analysis of Interference HF Range // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.
5. Лобов Е.М. Применение банка цифровых фильтров в задачах обработки широкополосных сигналов декаметрового диапазона // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2024. Т. 15, № 1. С. 50-55. EDN HFKPAD
6. Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О. и др. Современные методы обработки широкополосных сигналов радиолний связи в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Распространение радиоволн : Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16-19 мая 2023 года. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. С. 43-50. EDN XBZDWE
7. Лобов Е.М., Липаткин В.И., Лобова Е.О., Чиров Д.С. Результаты разработки вычислительно эффективного алгоритма совместного обнаружения сигналов и оценивания их параметров в условиях широкополосного ионосферного канала // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 2. С. 11-18. EDN LWJDYS

8. Lobov E.M., Lobova E.O., Lipatkin V.I., Poborchaya N.E. Optimal detection of HF radiolinks broadband signal with joint amplitude, phase, and dispersion distortion value estimation // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2023. Vol. 6, No. 1. pp. 230-234. DOI 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178573. EDN HPDAZO

9. Лобов Е.М. Регулярные аналитические выражения для вычисления качества оценивания параметров широкополосного сигнала в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2024. Т. 15, № 2. С. 46-51. EDN DQBRZJ

10. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №9. – С. 40-47. EDN: UMMUVT.

11. Аджиев С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Липаткин В.И. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 5. С. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74. EDN: UWFNTB.

12. Varlamov V.O., Lobov E.M., Lobova E.O., Liberman E.A. Research of the hybrid filter bank frequency equalizer transfer function coefficients estimation quality // В сборнике: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021. pp. 9416060. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416060. EDN: ATNBDI.

13. Варламов В.О., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Лобов Е.М. Сравнение качества оптимальной фильтрации наклона дисперсионной характеристики фильтром Стратоновича и сигма-точечным фильтром Калмана // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 1. С. 12-19. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-1-12-19. EDN ROHOSI

14. Lobova E.O., Varlamov V.O., Lobov E.M. Comparison of optimal filtering algorithms of the channel dispersion slope and the signal phase shift // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 235-239. DOI 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178533. EDN LFFVYBB

15. Lobov E.M., Lobova E.O. Varlamov V.O. Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 283-287. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032. – EDN YRJGTN.

16. Lobov E.M., Lobova E.O. Varlamov V.O. Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the

Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.

17. ITU-T Recommendation G-107: The E-model: a computational model for use in transmission planning, 2015.

18. http://www.rowetel.com/?page_id=452

19. Kandaurov N.A., Lobova E.O., Varlamov V.O., Telengator K.E. Signal-Code Constructions for Wideband Signals Based on M-Cpfsk and Non-Binary Error-Correcting Codes // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 201-204. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091988. EDN IRQGTJ

20. Lobov E.M., Grigorieva A.D., Varlamov V.O. On Progressive Edge Growth Parity Check Matrix Generation for NB-LDPC Codes in HF Communications // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617767.

21. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с. EDN UKUQVR

22. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И., Овчинников В.В. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 1. Модели распространения волновых пакетов в диспергирующих ионосферных каналах // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 8. С. 111-126. DOI 10.18127/j00338486-202408-11. EDN JFLEVN

23. Ryabova M.I., Ivanov D.V., Chernov A.A., Ovchinnikov V.V. Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020, Svetlogorsk, 01-03 июля 2020 г. Svetlogorsk, 2020. P. 9166094. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166094. EDN FJJBGT.

24. Varlamov V.O., Lobov E.M. Error Correction Codes Parameters Optimization in Wideband HF Range Digital Voice Radio Links // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496777.

25. ITU-R Recommendation P.368-10: Ground-Wave Propagation Prediction Method for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz, 2022.

26. ITU-R Recommendation P.372-14 Radio noise, 2019.

27. Варламов О.В., Варламов В.О. Распределение максимальных уровней атмосферных радиозумов в диапазонах низких частот и средних частот по территории Земли // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 42-51. EDN: ZWLTYD.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ERROR CORRECTION CODE RATE OF THE HF RANGE DIGITAL VOICE RADIO LINK

Vladimir O. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, f.vvo@bk.ru

Abstract

The development of digital voice radio links for the decameter wavelength range, capable for operating both with signals propagating along the Earth's surface and with those reflected from the ionosphere, is an urgent task. However, the requirements for power consumption and dimensions imposed on such systems lead to strict restrictions on the energy budget. This fact determines the necessity to develop methods for determining the parameters of a radiogram, taking into account the requirements for the payload of the communication line and the results of predicting the channel state in order to improve the noise immunity of the radio link. This paper presents a method for determining the relationship between the duration of the synchronization sequence and the code block using the criterion of the highest joint probability of detecting the synchronization sequence and decoding the data block. In this case, the limitation on the maximum duration of the radiogram is taken into account, which allows expressing the desired relationship through the rate of the noise-resistant code of the digital voice radio line. The proposed method takes into account the results of forecasting during the propagation of a signal from a transmitting to a receiving station along the Earth's surface, and during reflection from the ionosphere depending on the frequency, which makes it possible to determine the code rate that maximizes the specified probability over the longest period of time.

Keywords: UHF range, ionospheric channel, voice radio links, wideband signal, NB-LDPC code.

References

- [1] E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, D.N. Shubin and V.O. Varlamov, "Modern methods of processing broadband signals under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," *Radiotekhnika*, 2023, no. 12, pp. 17-31
- [2] O.V. Varlamov, "The Technology of Creating a Digital Broadcasting Network of the DRM Standard for the Russian Federation," D.Sc. Thesis, MTUCI, Moscow, Russia, 2017.
- [3] 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.
- [4] N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Analysis of Interference HF Range," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.
- [5] E.M. Lobov, Application of a digital filter bank in the tasks of processing broadband signals of the decameter range," *Systems of synchronization, signal generation and processing*, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 50-55.
- [6] E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, D.N. Shubin and V.O. Varlamov, "Modern methods of processing broadband signals of radio communication lines under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," *Thesis of the XXVIII All-Russian Open Scientific Conference*, Yoshkar-Ola, May 16-19, 2023, pp. 43-50, 2023.
- [7] E.M. Lobov, V.I. Lipatkin, E.O. Lobova, and D.S. Chirov, "Results of the development of a computationally efficient algorithm for joint detection of signals and estimation of their parameters in conditions of a wideband ionospheric channel," *Digital signal processing*, 2024, no. 2, pp. 11-18.
- [8] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, N.E. Poborchaya, "Optimal detection of HF radiolinks broadband signal with joint amplitude, phase, and dispersion distortion value estimation," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 230-234. DOI 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178573.
- [9] E.M. Lobov, "Regular analytical expressions for calculating the quality of estimation of broadband signal parameters under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*, 2024, vol 15, no. 2, pp. 46-51.
- [10] A.S. Kryukovsky, D.S. Lukin, D.V. Rastyagaev, Yu. I. Skvortsova, "The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radiowaves in ionospheric to medium," *T-Comm*. 2015. Vol 9. No. 9, pp. 40-47.
- [11] S.S. Adjemov, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, "Algorithms of estimating and compensating the dispersion distortions of wideband signals in the HF channel," *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. 5, pp. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74.
- [12] V.O. Varlamov, E.M. Lobov, E.O. Lobova, E.A. Liberman, "Research of the hybrid filter bank frequency equalizer transfer function coefficients estimation quality," *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Conference Proceedings. 2021, pp. 9416060. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416060.
- [13] V.O. Varlamov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova and E.M. Lobov, "Comparison of the quality of optimal filtering of the dispersion characteristic slope by the Stratonovich filter and the Kalman sigma-point filter," *T-Comm*, 2023, vol 17, no. 1, pp. 12-19.
- [14] E.O. Lobova, V.O. Varlamov, E.M. Lobov, "Comparison of optimal filtering algorithms of the channel dispersion slope and the signal phase shift," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2023. Vol. 6, no. 1, pp. 235-239. DOI 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178533.
- [15] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel," *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 283-287. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.
- [16] E.M. Lobov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.
- [17] ITU-T Recommendation G-107: The E-model: a computational model for use in transmission planning, 2015.
- [18] http://www.rowetel.com/?page_id=452
- [19] N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, K.E. Telengator, "Signal-Code Constructions for Wideband Signals Based on M-Cpfsk and Non-Binary Error-Correcting Codes," *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 201-204. DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091988.
- [20] E.M. Lobov, A.D. Grigorieva and V.O. Varlamov, "On Progressive Edge Growth Parity Check Matrix Generation for NB-LDPC Codes in HF Communications," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617767.
- [21] L.E. Varakin, "Communication systems with noise-like signals," Moscow: Radio and Communications, 1985. 384 p.
- [22] D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, M.I. Ryabova and V.V. Ovchinnikov, "Dispersion effects in ionospheric radio channels. Part I. Models of wave packet propagation in dispersive ionospheric channels," *Radiotekhnika*, 2024, vol. 88, no. 8, pp. 111-126.
- [23] M.I. Ryabova, D.V. Ivanov, A.A. Chernov, V.V. Ovchinnikov, "Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde," *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020*, Svetlogorsk, P. 9166094. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166094.
- [24] V.O. Varlamov, E.M. Lobov, "Error Correction Codes Parameters Optimization in Wideband HF Range Digital Voice Radio Links," *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496777.
- [25] ITU-R Recommendation P.368-10: Ground-Wave Propagation Prediction Method for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz, 2022.
- [26] ITU-R Recommendation P.372-14 Radio noise, 2019.
- [27] O.V. Varlamov, V.O. Varlamov, "Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth," *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 5, pp. 42-51.

Information about author:

Vladimir O. Varlamov, Assistant of the Department of Radio Engineering Systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1607-9166>

МНОГОВИДОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СВЕРТКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Пугачев Игорь Николаевич,
Хабаровский Федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ХФИЦ ДВО РАН), г. Хабаровск, Россия, ipugachev64@mail.ru

Тормозов Владимир Сергеевич,
Тихоокеанский государственный университет" (ТОГУ)
г. Хабаровск, Россия, 007465@pnu.edu.ru

Евтюков Станислав Сергеевич,
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
tm@spbgasu.ru

Смокталь Николай Николаевич,
Севастопольский государственный университет,
г. Севастополь, Россия, nnsnoktal@sevsu.ru

Золкин Александр Леонидович,
Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики" (ПГУТИ), г. Самара, Россия, nnsnoktal@sevsu.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-31-37

Manuscript received 15 December 2024;
Accepted 25 January 2025

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки
РФ, дополнительное соглашение от
21.04.2020 № 075-02-2020-152911

Ключевые слова: прогнозирование
транспортного потока, глубокое обучение,
машинное обучение, графовые нейронные сети

Быстрое развитие информационных технологий значительно повысило важность прогнозирования множества временных рядов, особенно в контексте анализа транспортных потоков, для эффективной обработки больших объемов данных. Прогнозирование транспортных потоков является ключевым элементом интеллектуальных транспортных систем (ИТС), предоставляя ценные научные и практические данные для планирования городского движения, улучшения качества и эффективности как логистического транспорта, так и общественных транспортных стратегий. В рамках интеллектуальных транспортных систем прогнозирование транспортных потоков остается одной из наиболее значимых задач. Однако, из-за сложных временных и пространственных зависимостей, свойственных последовательностям транспортных потоков, создание точных моделей прогнозирования с использованием кольцевых нейронных сетей, графовых сетей и моделей трансформеров сталкивается с серьезными трудностями. Для преодоления этих проблем и использования преимуществ сверточных сетей, которые известны своей высокой вычислительной эффективностью и надежностью в извлечении признаков, предлагается новая модель прогно-

зирования транспортных потоков, основанная на многовидовой пространственно-временной свертке. Эта модель представляет собой инновационный подход к анализу и прогнозированию транспортных потоков, который сочетает в себе преимущества сверточных сетей с возможностями пространственно-временной свертки. Многовидовая свертка позволяет учитывать различные аспекты транспортных потоков, такие как временные зависимости, пространственные характеристики и взаимодействия между различными видами транспорта. Это делает модель более гибкой и адаптивной к разнообразным условиям и изменениям в транспортной инфраструктуре. Применение многовидовой пространственно-временной свертки в модели прогнозирования транспортных потоков позволяет значительно улучшить точность и надежность прогнозов, что, в свою очередь, способствует более эффективному управлению городским движением и оптимизации транспортных систем. Внедрение этой модели может привести к значительным улучшениям в области логистики, общественного транспорта и общей транспортной инфраструктуры, что сделает города более удобными и эффективными для жителей и гостей.

Информация об авторах:

Пугачев Игорь Николаевич, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН), заместитель директора по научной работе ХФИЦ ДВО РАН, д.т.н., г. Хабаровск, Россия

Тормозов Владимир Сергеевич, ФГБОУ ВО "Тихоокеанский государственный университет" (ТОГУ), доцент высшей школы кибернетики и цифровых технологий к.т.н., г. Хабаровск, Россия

Евтюков Станислав Сергеевич, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Автомобильно-дорожный факультет, заведующий кафедрой транспортных систем, д.т.н., доцент, г. Санкт-Петербург, Россия

Смокталь Николай Николаевич, ФГАУ ВО "Севастопольский государственный университет", старший преподаватель кафедры "Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников", г. Севастополь, Россия

Золкин Александр Леонидович, ФГБОУ ВО "Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ПГУТИ), доцент кафедры "Информатика и вычислительная техника", к.т.н., г. Самара, Россия

Для цитирования:

Пугачев И.Н., Тормозов В.С., Евтюков С.С., Смокталь Н.Н., Золкин А.Л. Многовидовая пространственно-временная свертка для повышения точности прогнозирования транспортных потоков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 31-37.

For citation:

I. N. Pugachev, V. S. Tormozov, S. S. Evtyukov, N. N. Smoktal, A. L. Zolkin, "Multi-view spatial-temporal convolution to improve the accuracy of traffic flow forecasting," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.2 pp. 31-37. (in Russian)

Введение

С ускорением развития информационных технологий, прогнозирование транспортных потоков стало критически важным для анализа больших данных. Как фундамент интеллектуальной транспортной системы, оно имеет значительное научное и практическое значение для планирования городского движения, улучшения качества и эффективности логистики и общественного транспорта. Однако, извлечение пространственно-временных признаков из сложных многомерных данных о транспортных потоках и реализация комплексного прогнозирования от начала до конца остается исследовательской задачей. Основная проблема прогнозирования транспортных потоков заключается в сложной связи между многомерными данными и извлечении постоянно меняющихся пространственно-временных признаков.

Традиционные статистические методы и классические методы машинного обучения, такие как локальная регрессия и фильтр Калмана, подходят для прогнозирования одиночных последовательностей, но не могут эффективно обрабатывать сложные многомерные данные. Новые методы, такие как сверточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (RNN) и автоматические кодировщики, достигли более точного извлечения признаков временных рядов. Графовая сверточная сеть (GCN) извлекает уникальные пространственные признаки данных о транспортных потоках, используя сверточную операцию над графами. Многослойные модели, которые извлекают пространственные и временные признаки одновременно, постоянно обновляют лучшие результаты прогнозирования транспортных потоков.

В последнее время методы, основанные на представлении графов и свертке графов, достигли заметного прогресса в прогнозировании многомерных временных рядов. Глубокие модели обучения, такие как CNN и RNN, эффективно захватывают признаки на евклидовых данных, но требуют адаптации для применения к графовым данным, что привело к развитию GCN. Операции свертки графов включают пространственную свертку графов и свертку графов в спектральной области.

Прогнозирование транспортных потоков имеет важное значение для планирования городской инфраструктуры: строительство дорог, мостов и транспортных узлов. Точное прогнозирование транспортных потоков может помочь городским планировщикам принимать обоснованные решения о развитии инфраструктуры, что может привести к уменьшению пробок, улучшению безопасности дорожного движения и снижению уровня загрязнения воздуха.

Более того, прогнозирование транспортных потоков может быть использовано для оптимизации маршрутов общественного транспорта, что может привести к уменьшению времени в пути и улучшению качества обслуживания пассажиров, а также для мониторинга и управления транспортными потоками в реальном времени, что может помочь в предотвращении пробок и улучшении безопасности дорожного движения.

В целом, прогнозирование транспортных потоков является важной задачей, которая требует разработки новых методов и алгоритмов для эффективного извлечения пространственно-временных признаков из сложных многомерных данных. Развитие методов, основанных на представлении

графов и свертке графов, может помочь в решении этой задачи и привести к улучшению качества и эффективности транспортных систем.

Подготовка и установка зависимостей

На основе проанализированных источников можно сделать вывод, что многовидовая пространственно-временная свертка широко используется в прогнозировании транспортных потоков. Исследования, рассмотренные в статье, демонстрируют эффективность этого подхода в захвате сложных пространственных и временных зависимостей в транспортных данных.

Использование многовидовой пространственно-временной свертки для прогнозирования транспортных потоков было впервые предложено в [1], где авторы предложили новую модель, которая объединяет сверточные нейронные сети (CNN) и графовые сверточные сети (GCN) для захвата как пространственных, так и временных зависимостей в транспортных данных. Этот подход был показан более точным и эффективным по сравнению с традиционными методами.

Последующие исследования развили это направление, исследуя использование многовидовой пространственно-временной свертки в различных приложениях прогнозирования транспортных потоков. Например, [2] использовали многовидовую пространственно-временную сверточную сеть для прогнозирования транспортных потоков на автомагистралях, достигнув высокой точности и устойчивости. Аналогично, [3] применили этот подход к прогнозированию транспортных потоков в городских условиях, демонстрируя его эффективность в захвате сложных пространственных и временных паттернов.

Другие исследования были сосредоточены на улучшении производительности многовидовых пространственно-временных сверточных сетей для прогнозирования транспортных потоков. Например, [4] предложили новый механизм внимания для селективного фокусирования на соответствующих пространственных и временных признаках, что привело к улучшению точности прогнозирования. Между тем, [5] разработали подход к трансферному обучению для адаптации многовидовых пространственно-временных сверточных сетей к новым транспортным сценариям, уменьшив потребность в обширном повторном обучении.

Использование многовидовой пространственно-временной свертки также было исследовано в других связанных областях, таких как прогнозирование транспортного спроса [6] и обнаружение транспортных инцидентов [7]. Эти исследования демонстрируют универсальность и эффективность этого подхода в захвате сложных пространственных и временных зависимостей в транспортных данных.

Кроме того, [8] предоставили всесторонний обзор методов глубокого обучения для прогнозирования транспортных потоков, включая многовидовую пространственно-временную свертку. Этот обзор подчеркнул сильные и слабые стороны этих подходов и предоставил руководство для будущих исследований.

Наконец, [9] предложили новый фреймворк для интеграции многовидовой пространственно-временной свертки с другими машинными алгоритмами, такими как графовые нейронные

сети и обучение с подкреплением, для создания более полной системы прогнозирования транспортных потоков.

В целом, обзорные исследования демонстрируют эффективность многовидовой пространственно-временной свертки в прогнозировании транспортных потоков и подчеркивают ее потенциал для дальнейшего развития и применения в этой области [10].

Динамическое представление гиперграфа данных о транспортном потоке

Прогнозирование транспортного потока (ТП) – сложная задача с пространственно-временной зависимостью. Прогнозирование ТП всегда было одной из самых сложных задач в области транспортной инфраструктуры. Это связано с тем, что поток транспорта зависит от двух основных факторов: пространственной и временной зависимостей.

Пространственная зависимость ТП означает, что изменение его объема напрямую зависит от топологии городской улично-дорожной сети (УДС). Условия ТП на верхних дорогах влияют на условия на нижних дорогах через эффект переноса. Через эффект обратной связи состояние ТП на нижних дорогах, в свою очередь, влияет на условия потока на верхних дорогах. Это означает, что поток на одной дороге может влиять на поток соседних дорог, таким образом порождая сложную систему взаимосвязей.

Временная зависимость ТП означает, что объем потока динамически изменяется со временем, что в основном проявляется в периодичности и тренде. Это означает, что поток может изменяться в зависимости от времени суток, дня недели, месяца и года. Например, поток может быть более интенсивным в часы пик, а также в дни праздников и выходных. Кроме того, временная зависимость потока может быть связана с другими факторами, такими как погода, дорожные работы, особые события и т.д. Это означает, что прогнозирование ТП должно учитывать не только пространственную зависимость, но и временную зависимость, чтобы обеспечить точное и надежное прогнозирование.

Дополнительные факторы, влияющие на состояние ТП:

- погодные условия: дождь, снег, жара и др.;
- дорожные работы: ремонт дорог, строительство новых дорог и др.;
- особые события: спортивные мероприятия, концерты, фестивали и др.;
- часы пик и дни недели, месяцы года.

Прогнозирование транспортных потоков является сложной задачей, для решения которой необходимо учитывать, как пространственную, так и временную зависимости. Для решения этой задачи используются различные методы и модели, которые могут помочь обеспечить точное и надежное прогнозирование. Это может помочь улучшить управление потоками на УДС, уменьшить пробки и повысить безопасность на дорогах.

Построение модели потока транспортных потоков с помощью графовой нейронной сети и воротной циклической единицы

В современном мире управление и прогнозирование характеристик транспортных потоков становятся все более

актуальными задачами. Для их решения предлагается использовать графовую нейронную сеть (GCN) и воротную циклическую единицу (GRU).

Графовая нейронная сеть (GCN) представляет собой мощный инструмент для моделирования сложных систем, таких как дорожная сеть. Она позволяет учитывать топологию дорожной сети, что критически важно для прогнозирования. GCN может учитывать различные факторы, такие как интенсивность, время суток, день недели и другие. Воротная циклическая единица (GRU) является важным компонентом, который позволяет захватывать динамическое изменение данных на дороге и моделировать временную зависимость. GRU может учитывать различные факторы, такие как погода, дорожные работы, специальные события и другие. Комбинация GCN и GRU позволяет создать мощную модель, способную прогнозировать потоки транспорта с высокой точностью. Модель T-GCN, предложенная в этой статье, может не только реализовывать краткосрочное прогнозирование, но и использоваться для долгосрочных задач.

Результаты прогнозирования модели T-GCN показывают стабильное состояние при различных горизонтах прогнозирования, что указывает на универсальность модели для различных задач прогнозирования транспортных потоков. Были использованы два реальных набора данных для оценки предлагаемого подхода. Результаты показывают, что по сравнению со всеми базовыми методами, ошибка прогнозирования T-GCN значительно ниже, что свидетельствует о преимуществах модели в прогнозировании ТП.

Однако, несмотря на все преимущества, графовые нейронные сети и воротные циклические единицы имеют свои ограничения. Они требуют значительных вычислительных ресурсов и времени для обучения и обработки данных. Они могут быть менее эффективными при работе с большими объемами данных или сложными топологиями. Тем не менее, несмотря на эти ограничения, графовые нейронные сети и воротные циклические единицы продолжают развиваться и совершенствоваться. В будущем они могут стать еще более эффективными и широко используемыми инструментами для управления и прогнозирования ТП.

Графовые нейронные сети и воротные циклические единицы представляют собой перспективное направление в области управления и прогнозирования. Они позволяют учитывать сложные взаимосвязи между различными элементами транспортной системы и динамически адаптироваться к изменениям в окружающей среде. Это делает их незаменимыми инструментами для обеспечения эффективного и безопасного движения на дорогах.

Предложенный подход является мощным инструментом для прогнозирования ТП и может быть использован для решения различных задач, связанных с управлением, планированием маршрутов и логистикой. Подход может быть расширен для включения различных факторов, влияющих на ТП, таких как погодные условия, закрытие дорог, специальные события и другие. Интеграция этих факторов в модель может улучшить точность и устойчивость прогнозирования:

1. Улучшенная точность прогнозирования: Модель T-GCN обеспечивает высокую точность прогнозирования;

2. Возможность прогнозирования на различных горизонтах: Модель может использоваться для прогнозирования как на краткосрочные, так и на долгосрочные периоды;

3. Учет различных факторов: Модель учитывает множество факторов, влияющих на ТП, что позволяет более точно прогнозировать его поведение;

4. Интеграция с другими системами управления транспортом: T-GCN может быть легко интегрирована с существующими системами управления для повышения их эффективности;

5. Улучшенная безопасность на дорогах: Прогнозирование ТП с помощью T-GCN может способствовать улучшению безопасности на дорогах, позволяя своевременно реагировать на изменения в дорожной ситуации.

Разработка программы

Дорожная сеть города лучше представима в виде графа, а не простой двумерной сетки, что указывает на то, что модель CNN не способна эффективно представлять сложную топологию этой сети и, как следствие, не может точно отражать пространственные зависимости [11]. Используя матрицу смежности A вместе с собственной матрицей X , модель GCN использует спектральные методы, основанные на матрице Лапласа графа, для обработки данных. В этом контексте GCN опираются на собственные векторы и собственные значения матрицы Лапласа, что позволяет учитывать глобальные свойства графа и анализировать частотные характеристики. Собственные векторы представляют собой функции, которые могут быть использованы для фильтрации сигналов на графе, а собственные значения определяют частоты этих функций. Таким образом, GCN эффективно агрегируют информацию от соседних узлов, что способствует более точному представлению пространственных зависимостей на графе.

В этой статье используется сверточная сеть, состоящая из двух слоев, модель GCN которой предназначена для фиксации пространственных зависимостей и представлена следующим образом:

$$f(X, A) = \gamma \bar{D} W_1 f_{ReLU}(\bar{D} X W_0).$$

Функциональная формула, изложенная выше, иллюстрирует, как модель GCN используется для извлечения пространственных характеристик из данных о ТП.

Как показано на рисунке 1, предполагая, что узел 4 является центральной дорогой, предполагая, что узел 4 является центральной дорогой, модель GCN может получить топологическую связь между центральной дорогой и окружающими дорогами, закодировать структуру топологии сети и атрибуты дорог, и получить пространственную зависимость.

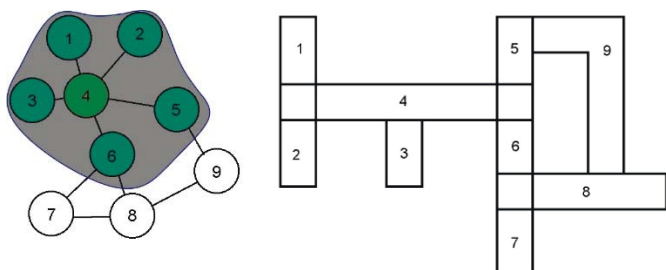


Рис. 1. Предположение, что узел 4 является центральной дорогой: выделенные узлы показывают, что эти перегоны соединены с центральной дорогой, путем получения топологической связи между центральной дорогой и соединенными перегонами может быть получен пространственный признак

Была выбрана модель GRU для получения временной зависимости из данных ТП [12]. GRU использует скрытое состояние в $(k-1)$ момент времени и текущую информацию о ТП в качестве входных данных для получения состояния в k -ый момент времени. Как показано на рисунке 2, GRU использует сброс ворот (a_k) для управления степенью игнорирования информации о состоянии в предыдущий момент, обновление ворот (b_k) для управления степенью, в которой информация о состоянии в предыдущий момент времени переносится в текущее состояние, и содержимое памяти (c_k) для хранения информации о потоках в k -ый момент времени.

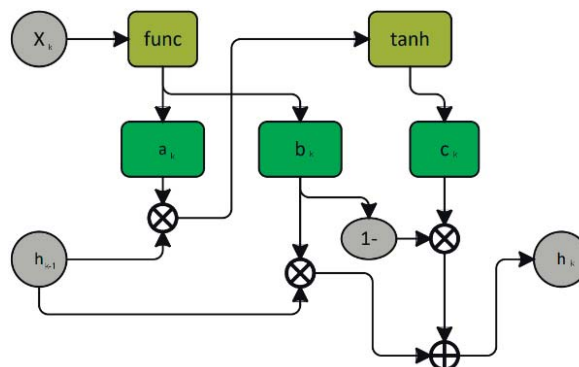


Рис. 2. Архитектура модели GRU (Gated Recurrent Unit)

Благодаря применению GRU модель может захватывать тенденцию изменения исторической информации и имеет способность захватывать временную зависимость. Это позволяет моделировать и предсказывать будущие значения с высокой точностью [13]. Кроме того, GRU может быть использована для анализа и прогнозирования других типов временных рядов, таких как данные о погоде, финансовые данные и т.д.

Условия проведения исследований

Сбор данных: для проведения исследований был организован сбор данных, полученных с детекторов транспорта, расположенных на основных элементах УДС города. Эти детекторы предоставляют непрерывные данные о скорости движения транспортных средств, которые являются критически важными для анализа [14] и прогнозирования транспортных потоков. Сбор данных осуществлялся в течение месяца, с 1 по 31 октября 2023 г., с интервалом измерений каждые 15 минут. Такой подход обеспечивает достаточное количество данных для обучения и тестирования модели, а также позволяет учесть изменчивость транспортных потоков в течение суток и дней недели.

Обработка данных: после сбора данные подвергались тщательной предварительной обработке. Этот этап включал в себя несколько ключевых шагов: в первую очередь выполнялась очистка данных от выбросов и пропусков, которые могут исказить результаты анализа [15]. Для этого применяются статистические методы и алгоритмы машинного обучения, способные автоматически идентифицировать и корректировать такие аномалии. Далее, создается матрица смежности, которая описывает пространственные связи между различными участками дорог, что важно для моделирования транспортных сетей [16]. Кроме того, создавалась матрица, отражающая изменения скорости движения во времени, для того чтобы позволить модели учитывать временные паттерны в

движении. Такие данные были нормированы на вещественный интервал [0,1] для улучшения сходимости модели во время обучения, что является стандартной практикой в машинном обучении для ускорения и стабилизации процесса обучения [17].

Разделение данных: Нормированные данные были условно разделены на обучающий и тестовый наборы в соотношении 80% к 20% с помощью ручной маркировки обучающих примеров. Такое достаточно часто используемое разделение позволяет обучить модель на большей части данных, обеспечивая ей достаточное количество информации для изучения закономерностей еще перед проверкой её эффективности на независимом наборе данных. Это позволяет оценить, насколько хорошо модель обобщает новые, нераспознанные ранее паттерны [18].

Обучение модели: Модель T-GCN обучалась на обучающем наборе данных с использованием выбранных гиперпараметров [19]. Процесс обучения включал в себя несколько эпох, в течение которых модель адаптировала свои параметры для минимизации ошибки прогнозирования. Во время обучения осуществлялся мониторинг метрик, для того чтобы контролировать процесс обучения и своевременно корректировать параметры, в случае необходимости [20-23].

Заключение

Проведенные исследования продолжают и детализируют исследование авторов в данном направлении [24-27]. Приведенная детальная методология обеспечивает систематический подход к проведению исследования прогнозирования транспортных потоков в городе с использованием модели T-GCN, включая все необходимые этапы от сбора и обработки данных до анализа результатов и документирования исследования.

Анализ результатов (рис. 3) показал, что модель T-GCN может захватывать пространственные и временные зависимости в данных о транспортных потоках.

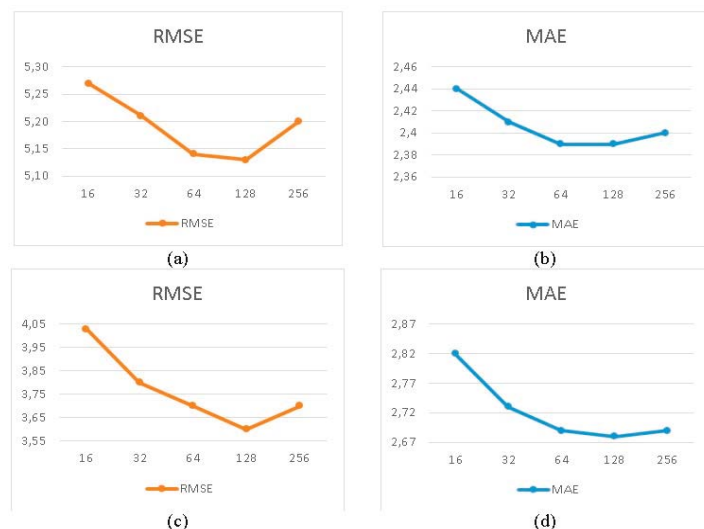


Рис. 3. Результаты тестирования разработанной модели: (а) Зависимость RMSE от количества скрытых элементов на обучающем наборе. (б) Зависимость MAE от количества скрытых элементов на обучающем наборе. (с) Зависимость RMSE от количества скрытых элементов на тестовом наборе. (д) Зависимость MAE от количества скрытых элементов на тестовом наборе

Использование матрицы смежности и временной матрицы позволило модели учитывать пространственные и временные паттерны в движении. Кроме того, применение GRU позволило модели захватывать тенденцию изменения исторической информации о ТП и иметь способность захватывать временную зависимость.

Результаты тестирования показали, что модель T-GCN может достигать высокой точности прогнозирования транспортных потоков. Зависимость RMSE и MAE от количества скрытых элементов на обучающем и тестовом наборах показала, что модель может эффективно прогнозировать транспортные потоки с высокой точностью.

В данной статье представлена методология прогнозирования транспортных потоков в городе Хабаровске с использованием модели T-GCN. Результаты тестирования показали, что модель T-GCN может эффективно прогнозировать транспортные потоки с высокой точностью. Использование матрицы смежности и временной матрицы позволило модели учитывать пространственные и временные паттерны в движении. Кроме того, применение GRU позволило модели захватывать тенденцию изменения исторической информации о ТП и иметь способность захватывать временную зависимость.

Данная методология может быть использована для прогнозирования транспортных потоков в других городах и регионах. Кроме того, модель T-GCN может быть использована для анализа и прогнозирования других типов временных рядов, таких как данные о погоде, финансовые данные и т.д.

В целом, данная статья представляет собой важный вклад в область прогнозирования транспортных потоков и может быть использована для улучшения качества и эффективности транспортных систем.

Литература

1. Пугачев И.Н. Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2010.
2. Xing Z. et al. Spatial linear transformer and temporal convolution network for traffic flow prediction // Scientific Reports. 2024. Т. 14. № 1. С. 4040.
3. Pugachev I.N. et al. Numerical evaluation of the traffic flow indicators using super-resolution satellite imagery // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. С. 1-4.
4. Пугачев И.Н., Тормозов В.С. Разработка нового метода детектирования и классификации транспорта средств по спутниковым изображениям // Дороги и мосты. 2023. № 1 (49). С. 199-220.
5. Пугачев И.Н., Тормозов В.С. Разработка метода детектирования объектов транспортных потоков по спутниковым фотоснимкам сверхвысокого разрешения // Вестник ДВО РАН. 2024. № 2. С. 33-41. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020033>, EDN: LDNKMO
6. Pugachev I.N., Kapsky D.V., Navoy D.V., Markelov G.Ya., Tormozov V.S., Shcheglov V.I. Synergy of approaches to improving intelligent transport systems of cities in Russia and Belarus. Khabarovsk: Pacific State University, 2020. 230 p. ISBN 978-5-7389-3154-3. EDN YDRMXN
7. Тормозов В.С., Василенко К.А., Золкин А.Л. Настройка и обучение многослойного перцептрона для задачи выделения дорожного покрытия на космических снимках города // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 343-348.
8. Tormozov V.S. Method of detection and classification of vehicles on ultra-high-resolution satellite images // Industrial ACS and controllers. 2019. № 6, pp. 18-24. DOI 10.25791/asu.06.2019.678. EDN WAMRQG

9. Huang X. et al. MD-GCN: a multi-scale temporal dual graph convolution network for traffic flow prediction // *Sensors*. 2023. Т. 23. № 2. С. 841.
10. Chen Ch., Minald A.A., Bogush R., Ma G., Weichen Y., Ablameiko S.V. Vehicle Detection and Classification in Super-Resolution Imagery Using Neural Networks // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2022. Vol. 89. No. 2, pp. 275-282.
11. Xu Z., Yuan J., Yu L., Wang, G., Zhu M. Machine Learning-Based Traffic Flow Prediction and Intelligent Traffic Management // *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2024. Т. 2. № 1. С. 18-27.
12. Tormozov V.S. Improving the performance of the algorithm for detecting and classifying vehicles in satellite images by reducing the search area using geoinformation about roads // *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and control*. 2019. No. 2, pp. 56-63. DOI 10.25586/RNU.V9187.19. 02.pp. 056. EDN LKERAT
13. Shi G. et al. Deep transformer-based heterogeneous spatiotemporal graph learning for geographical traffic forecasting // *iScience*. 2024. Т. 27. № 7.
14. Banerjee S., Dong M., Shi W. Spatial-temporal synchronous graph transformer network (stsgt) for covid-19 forecasting // *Smart Health*. 2022. Vol. 26. P. 100348.
15. Zhao W. et al. Spatio-temporal causal graph attention network for traffic flow prediction in intelligent transportation systems // *PeerJ Computer Science*. 2023. Vol. 9. P. e1484.
16. Tormozov V.S. Counting and Recognizing Cars on Satellite Images // *Scientific Notes of TSU*. 2017. Vol. 8, No. 3, pp. 126-134. EDN ZQNTUB
17. Zolkin A.L., Tormozov V.S., Gridina D.V. Intelligent software and information system for diagnostics and forecasting the technical condition of traction electric motors // *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 4 (96), pp. 92-97. DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-4-92-97. EDN EZSCNM
18. Пугачев И.Н., Скрипко П.Б., Шеуера Н.Г. Программный подход к комплексному сбору и подготовке данных об интенсивности движения транспортных средств, погодных условий и естественной освещенности в часовых интервалах // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Том 17. №10. С. 43-51.
19. Pugachev I., Kulikov Y., Markelov G., Sheshera N. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems // 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017, pp. 529–535.
20. Бурков С.М., Маркелов Г.Я., Пугачев И.Н. Задачи системного анализа и методология формирования интеллектуальной системы управления транспортным комплексом города // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2013. № 4 (31). С. 83-90.
21. Zhang Z. et al. A novel hybrid framework based on temporal convolution network and transformer for network traffic prediction // *Plos one*. 2023. Vol. 18. № 9. P. e0288935.
22. Pu S. et al. SGGformer: shifted graph convolutional graph-transformer for traffic prediction // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 22. P. 9024.
23. Bin Ри, Цзянсун Лю, Yan Kang, Цзянго Чен, Филип С.Ю. MVSTT: многовидовая пространственно-временная трансформаторная сеть для прогнозирования транспортных потоков // *IEEE Trans Cybern*. 2024 Март. No. 54 (3), pp. 1582-1595. doi: 10.1109/TCYB.2022.3223918
24. Пугачев И.Н., Шеуера Н.Г., Григоров Д.Е. Определение эффективных широт интервалов влияния температурных режимов на интенсивность транспортного потока с использованием ранговой корреляции Спирмена // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Том 18. №3. С. 34-40.
25. Пугачев И.Н., Евтюков С.С., Шеуера Н.Г., Григоров Д.Е. Максимальная обеспечиваемая скорость как ключевой показатель травматизма при ДТП. Способы сбора, обработки и анализа // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Том 18. №6. С. 46-54.
26. Пугачев И.Н., Евтюков С.С., Шеуера Н.Г., Григоров Д.Е. Прогноз интенсивности транспортного потока. Обучение с учителем. Метод случайных деревьев // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Том 18. №4. С. 36-47.
27. Бугаев А.С., Таташев А.Г., Яшина М.В., Лаэров О.С., Носов Е.А. Восстановление динамики транспортного потока на основе детерминированно-стохастической модели и данных с интеллектуально транспортных систем // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт*. 2019. Том 13. №10. С. 35-44. EDN: DLZNOX.

MULTI-VIEW SPATIAL-TEMPORAL CONVOLUTION TO IMPROVE THE ACCURACY OF TRAFFIC FLOW FORECASTING

Igor N. Pugachev, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (HFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia, ipugachev64@mail.ru

Vladimir S. Tormozov, Pacific National University, Higher School of Cybernetics and Digital Technologies, Khabarovsk, Russia, 007465@pnu.edu.ru

Stanislav S. Evtyukov, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia, tm@spbgasu.ru

Nikolay N. Smoktal, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, nnsnoktal@sevsu.ru

Alexander L. Zolkin, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PGUTY), Samara, Russia, alzolkin@list.ru

Abstract

The rapid development of information technology has made multiple time series forecasting, especially in the field of traffic flow analysis, increasingly important for big data evaluation. Traffic flow forecasting, acting as a basis for intelligent transportation systems (ITS), has significant scientific and practical value for urban traffic planning, improving the quality and efficiency of both logistics transport and public transport strategies. In an intelligent transportation system, traffic flow forecasting remains a critical task. However, due to the complex temporal and spatial dependencies inherent in traffic flow sequences, establishing an accurate forecasting model using ring neural networks, graph networks, and transformer models presents significant challenges. To take advantage of convolutional networks, which are known for their high computational efficiency and robust feature extraction capabilities, a novel traffic flow prediction model is proposed that utilizes multi-view spatio-temporal convolution.

Keywords: traffic flow prediction; deep learning; machine learning; graph neural networks

References

- [1] I. N. Pugachev, "Theoretical principles and methods of improving the efficiency of urban transport systems," Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Ural State University of Railway Engineering. Yekaterinburg, 2010.
- [2] Z. Xing et al., "Spatial linear transformer and temporal convolution network for traffic flow prediction," *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1, p. 4040.
- [3] I. N. Pugachev et al., "Numerical evaluation of the traffic flow indicators using super-resolution satellite imagery," *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2019, pp. 1-4.
- [4] I. N. Pugachev, V. S. Brakes, "Development of a new method for detecting and classifying vehicles from satellite images," *Roads and bridges*. 2023. No. 1 (49), pp. 199-220.
- [5] I. N. Pugachev, V. S. Tormozov, "Development of a method for detecting traffic flow objects from ultra-high resolution satellite photographs," *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2024. No. 2, pp. 33-41. <http://dx.doi.org/10.31857/S08697698240>
- [6] I. N. Pugachev, D. V. Kapsky, D. V. Navoy, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov, V. I. Shcheglov, "Synergy of approaches to improving intelligent transport systems of cities in Russia and Belarus," Khabarovsk: Pacific State University, 2020. 230 p. ISBN 978-5-7389-3154-3
- [7] V. S. Brakes, K. A. Vasilenko, A. L. Zolkin, "Setting up and training a multilayer perceptron for the task of highlighting the pavement on satellite images of the city," *Software products and systems*. 2020. Vol. 33. No. 2, pp. 343-348.
- [8] V. S. Tormozov, "Method of detection and classification of vehicles on ultra-high-resolution satellite images," *Industrial ACS and controllers*. 2019. No. 6, pp. 18-24. DOI 10.25791/asu.06.2019.678.
- [9] X. Huang et al., "MD-GCN: a multi-scale temporal dual graph convolution network for traffic flow prediction," *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 2, p. 841.
- [10] Chen Ch., A. A. Minald, R. Bogush, G. Ma, Y. Weichen, S.V. Ablameiko, "Vehicle Detection and Classification in Super-Resolution Imaging Using Neural Networks," *Journal of Applied Spectroscopy*. 2022. Vol. 89. No. 2, pp. 275-282.
- [11] Z. Xu, J. Yuan, L. Yu, G. Wang, M. Zhu, "Machine Learning-Based Traffic Flow Prediction and Intelligent Traffic Management," *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2024. Vol. 2. No. 1, pp. 18-27.
- [12] V. S. Tormozov, "Improving the performance of the algorithm for detecting and classifying vehicles in satellite images by reducing the search area using geoinformation about roads," *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and control*. 2019. No. 2, pp. 56-63. DOI 10.25586/RNU.V9187.19. 02.pp. 056.
- [13] G. Shi et al., "Deep transformer-based heterogeneous spatiotemporal graph learning for geographic traffic forecasting," *iScience*. 2024. Vol. 27. No. 7.
- [14] S. Banerjee, M. Dong, W. Shi, "Spatial-temporal synchronous graph transformer network (stsgt) for covid-19 forecasting," *Smart Health*. 2022. Vol. 26. p. 100348.
- [15] W. Zhao et al., "Spatio-temporal causal graph attention network for traffic flow prediction in intelligent transportation systems," *PeerJ Computer Science*. 2023. Vol. 9. p. e1484.
- [16] V. S. Tormozov, "Counting and Recognizing Cars on Satellite Images," *Scientific Notes of TSU*. 2017. Vol. 8, No. 3, pp. 126-134.
- [17] A. L. Zolkin, V. S. Tormozov, D. V. Gridina, "Intelligent software and information system for diagnostics and forecasting the technical condition of traction electric motors," *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 4 (96), pp. 92-97. DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-4-92-97.
- [18] I. N. Pugachev, P. B. Skripko, N. G. Sheshera, "A programmatic approach to the integrated collection and preparation of data on vehicle traffic intensity, weather conditions and natural illumination in hourly intervals," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No.10, pp. 43-51.
- [19] I. Pugachev, Y. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera, "Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems," *12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities", SPbOTSIC-2016*, September 28-30, 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. pp. 529-535.
- [20] S. M. Burkov, G. Ya. Markelov, I. N. Pugachev, "Tasks of system analysis and methodology of formation of an intelligent management system of the city's transport complex," *Bulletin of the Pacific State University*. 2013. No. 4 (31), pp. 83-90.
- [21] Z. Zhang et al., "A novel hybrid framework based on temporary convolution network and transformer for network traffic prediction," *Plos one*. 2023. Vol. 18. No. 9, pp. e0288935.
- [22] S. Pu et al., "SGGformer: shifted graph convolutional graph-transformer for traffic prediction," *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 22, p. 9024.
- [23] Bin Pu, Jiansun Liu, Yan Kang, Jianguo Chen, Philip S. Yu, "MVSTT: a multi-species space-time transformer network for predicting traffic flows," *IEEE Trans Cybern*. March 2024, no. 54 (3), pp. 1582-1595. DOI: 10.1109/TCYB.2022.3223918.
- [24] I. N. Pugachev, N. G. Sheshera, D. E. Grigorov, "Determination of effective latitudes of the intervals of influence of temperature conditions on the intensity of traffic flow using Spearman rank correlation," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 3, pp. 34-40.
- [25] I. N. Pugachev, S. S. Evtyukov, N. G. Sheshera, D. E. Grigorov, "Maximum provided speed as a key indicator of injuries in road accidents. Methods of collection, processing and analysis," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 6, pp. 46-54.
- [26] I. N. Pugachev, S. S. Evtyukov, N. G. Sheshera, D. E. Grigorov, "Forecasting the intensity of traffic flow. Learning with a teacher. Random Tree Method," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 4, pp. 36-47.
- [27] A. S. Bugaev, A. G. Tatshev, M. V. Yashina, O. S. Lavrov, E. A. Nosov, "Reconstruction of traffic flow dynamics based of deterministicstochastic model and data obtained from intelligent transport systems // T-Comm. 2019. Vol 13. No. 10, pp. 35-44.

Information about authors

Igor N. Pugachev, Deputy Director for Research, HFRC FEB RAS, Dr. tech. Sciences, Associate Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (HFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia

Vladimir S. Tormozov, Pacific National University, Associate Professor of the Higher School of Cybernetics and Digital Technologies, Ph.D. in Engineering, Khabarovsk, Russia

Stanislav S. Evtyukov, Automotive and Highway Faculty, Head of the Department of Methodological Systems, Dr. tech. Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

Nikolay N. Smoktal, FSAEI HE "Sevastopol State University", Senior Lecturer, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources, Sevastopol, Russia

Alexander L. Zolkin, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PGUTY), Associate Professor of the Department of Computer Ph.D. Science and Computer Engineering, Ph.D. in Engineering, Samara, Russia

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ГОРОДОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-38-44

Клюев Роман Владимирович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Косцов Алексей Валерьевич,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
МАДИ, Москва, Россия, kostsov_msfs@bk.ru

Добаев Александр Заурбекович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Тлехугов Астемир Муратович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Хабаета Камилла Муратовна,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Manuscript received 10 January 2025;
Accepted 07 February 2025

Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования "Интеллектуальные системы управления развитием улично-дорожной сети городов"; код научной темы, присвоенной учредителем - FEFG-2024-0005.

Ключевые слова: измерение интенсивности движения, транспортный поток, граничных интервал, анализ видеоряда, компьютерное зрение

Современные тенденции в развитии и трансформации городской среды неразрывно связаны с внедрением передовых компьютерных технологий. Улучшение условий проживания населения в городах - сложная многофакторная задача, важнейшей составляющей которой является создание и поддержание современной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей городские передвижения населения. В этой связи необходима актуализация данных о движении транспорта потоков и методов расчета параметров работы улично-дорожной сети городов России. Измерение отдельных характеристик транспортных потоков, таких как количество и типы проезжающих транспортных средств, средняя скорость движения и т.д., в настоящее время можно проводить в автоматическом режиме с использованием современных технических комплексов, включающих измерительные приборы и специализированное программное обеспечение. Расчет других характеристик, например, граничных интервалов времени при пересечении транспортных потоков, производится исключительно на основании натуральных измерений и требует значительно больших ресурсов. В статье рассмотрено инновационное программное обеспечение, которое позволяет выполнять автоматизированный сбор данных о характеристиках транспортного потока, в том числе характеристик, измерение которых в автоматическом режиме ранее не производилось. Это особенно актуально для актуализации расчетных методик по определению пропускной способности элементов улично-дорожной сети как основы для назначения мероприятий по повышению качества транспортного обслуживания населения городов.

Информация об авторах:

Клюев Роман Владимирович, д.т.н., профессор, зав. каф. ФГОБУ ВО "СКГМИ (ГТУ)", РСО-Алания, г. Владикавказ, Россия

Косцов Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент, зав. лаб., ФГОБУ ВО "СКГМИ (ГТУ)", РСО-Алания, г. Владикавказ, доцент, ФГБОУ ВО "МАДИ", Москва, Россия

Добаев Александр Заурбекович, Старший преподаватель, ФГОБУ ВО "СКГМИ (ГТУ)", РСО-Алания, г. Владикавказ, Россия

Тлехугов Астемир Муратович, м.н.с., ФГОБУ ВО "СКГМИ (ГТУ)", РСО-Алания, г. Владикавказ, Россия

Хабаета Камилла Муратовна, ФГОБУ ВО "СКГМИ (ГТУ)", РСО-Алания, г. Владикавказ, Россия

Для цитирования:

Клюев Р.В., Косцов А.В., Добаев А.З., Тлехугов А.М., Хабаета К.М. Разработка метода автоматизированной обработки характеристик транспортного потока для повышения качества транспортного обслуживания населения городов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 38-44.

For citation:

R. V. Klyuev, A. V. Kostsov, A. Z. Dobaev, A. M. Tlekhugov, K. M. Khabaeva, "The development of a method for automated processing of traffic flow characteristics in order to improve the quality of transport services for the urban population," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.2, pp. 38-44. (in Russian)

1. Введение

В условиях сохраняющихся до настоящего времени высоких темпов урбанизации и субурбанизации населения, продолжающихся процессов автомобилизации жителей нашей страны [1], непрерывно происходит увеличение затрат времени населения на транспортные передвижения, что приводит к снижению удовлетворенности населения городской средой. Так, например, в исследовании Peng Nie and Alfonso Sousa-Posa (2018) [2] были изучены взаимосвязи между временем в пути на работу и оценкой субъективного благополучия (оценки качества транспортной системы) в выборке сотрудников в возрасте от 16 до 65 лет в городских районах Китая.

В исследовании показано, что более длительное время в пути на работу связано с более низким уровнем как удовлетворенности жизнью и транспортной системой, особенно когда время в пути на работу составляет более одного часа в день. В исследовании (Louafi Bouzouina, Ioannis Baraklianos et al, 2021) также [3] показано, что крайне важным аспектом выбора места жительства населения играет транспортная доступность территорий: особое внимание в исследовании уделяется оценке удовлетворенности качеством транспортного обслуживания в зависимости от удаленности мест проживания от мест приложения труда. В исследовании показано, что удаленность от мест приложения труда играет важнейшую роль в выборе места жительства.

Таким образом можно констатировать, что в условиях крупных и крупнейших городов, увеличение затрат населения на транспортные передвижения формируют негативное отношение к городской среде в целом и во многом определяют выбор места проживания, а мероприятия по развитию транспортных систем и увеличению скоростей сообщения напротив способствует развитию городских и пригородных территорий (Baum-Snow N., 2007) [4], повышению удовлетворенности населения качеством городских пространств, повышению экологического благополучия городских территорий.

Увеличение затрат времени населения на совершение поездок способствует также и повышению расходов на передвижения по городу: в исследовании Michael L. Anderson, Fangwen Lu et al. (2017) [5] показано, что задержки в движении автомобилей (пробки) играют важнейшую роль не только в формировании экономических показателей работы транспортных систем, но и в формировании экономических показателей работы города в целом. В исследовании особо подчеркивается, что дополнительно к традиционным показателям, учитываемым при оценке экономических показателей работы транспорта, необходимо учитывать научно обоснованные показатели, учитывающие снижение удовлетворенности жителей при увеличении загрузки дорожных сетей и увеличению задержек в движении автомобилей.

В этих условиях, одной из важнейших задач по повышению качества городской среды является сокращение затрат времени населения на транспортные передвижения, что может быть достигнуто различными путями. Одним из мероприятий, направленных на снижение затрат времени населения городов на передвижение является оптимизация работы светофорных объектов, режимов работы нерегулируемых и саморегулируемых (кольцевых) пересечений за счет более точного учета современных режимов движения транспортных потоков.

За последние десятилетия существенно изменилась структура парка автомобилей и их динамические качества, поэтому применение широко изученных и апробированных закономерностей движения транспортных потоков должно быть верифицировано для современных условий движения на регулируемых, нерегулируемых и саморегулируемых (кольцевых) пересечениях в условиях крупных и крупнейших городов нашей страны.

Наиболее широко используемые методы изучения закономерностей движения автомобилей основаны на проведении натуральных наблюдений за режимом движения транспортных потоков, которые, как правило, выполняются путем записи видеоряда с последующей обработкой полученных данных в камеральных условиях. Обработка видеоряда производится в ручном или полуавтоматическом режиме, что приводит к существенным затратам времени на проведение таких исследований и ограничивает их проведение из-за высокой трудоемкости.

Цель данной статьи – разработка инновационного программного обеспечения, позволяющего на основе машинного зрения обеспечивать обработку данных о характеристиках транспортных потоков, которые используются для установления величин пропускной способности элементов улично-дорожной сети в автоматическом режиме.

Несмотря на ограничения данного метода, предполагается, что он позволит повысить точность определения характеристик движения транспортных потоков, которые являются основой для разработки мероприятий по повышению качества транспортного обслуживания городских территорий, являются основой для построения сетей «умного города» и применения компонентов интеллектуальных транспортных систем [6, 7]. Проведение измерений интенсивности дорожного движения традиционно применяется при изучении особенностей отдельных узлов дорожной сети [8-10], комплексной оценке эффективности работы ее работы [11], проектировании дорожно-транспортной инфраструктуры [12]. Учет интенсивности движения может проводиться визуально или с использованием технических средств и специализированного программного обеспечения.

Проведение измерений с использованием средств видеодиагностики и их последующей обработкой имеет ряд преимуществ по сравнению с проведением натуральных измерений: для проведения измерения достаточно одного человека с видеокамерой; полученная видеозапись, при выборе правильного ракурса, может служить основой для нескольких измерений с проведением анализа разных полос и направлений движения. Кроме того, видеозапись может быть обработана в автоматизированном или полуавтоматизированном режиме, что позволяет значительно сократить трудозатраты на проведение измерений.

2. Разработка программного обеспечения для обработки характеристик транспортного потока

В рамках выполнения работ по изучению интенсивности транспортного потока г. Владикавказа, было разработано программное обеспечение, позволяющее накапливать информацию о движении транспорта, а также осуществлять ее дальнейший анализ и обработку. Измерение интенсивности транспортного потока с использованием разработанного программного обеспечения осуществляется в несколько этапов:

1. Проведение видеосъемки движения автомобилей на пересечении автомобильных дорог или получение видеозаписи движения из других источников. При проведении видеосъемки, необходимо подобрать ракурс таким образом, чтобы пересечение автомобилей на видеозаписи, движущихся по разным полосам, было минимальным. Как правило, такой ракурс можно подобрать, если видеокамера располагается значительно выше автомобильного потока. Также источником данных могут быть записи уличных систем видеонаблюдения или систем видеонаблюдения торговых объектов. Серьезных требований к качеству видеозаписей не предъявляется: в рамках испытаний приемлемого результата удавалось добиться на видеозаписях с разрешением 1280x720 пикселей, – запись подобного качества позволяют вести все современные видеокамеры. Для обеспечения более точного определения временных интервалов на записи, битрейт (количество кадров в секунду) записи рекомендуется устанавливать равным 30 или 60.

2. Обработка видео с использованием алгоритмов машинного зрения. На анализируемой полосе движения определяется контрольная область фиксации проезда автомобилей по ней. Область должна располагаться непосредственно перед перекрестком и пересекаться каждым, движущимся по анализируемой полосе автомобилем. Пересечение области пешеходами, автомобилями, движущимися по другим полосам, должно быть минимальным. В ходе обработки на видео автоматически выделяются движущиеся автомобили, а также фиксируются кадры начала и окончания пересечения автомобилями области фиксации проезда. Пример выделенных кадров представлен на рисунке 1 (контрольная область на изображении выделена белым прямоугольником).



а)



б)

Рис. 1. Выделение кадров начала и окончания пересечения движущимся автомобилем области фиксации: а) – проезд автомобиля контрольной области фиксации; б) – освобождение автомобилем контрольной области фиксации

Несмотря на то, что выбор оптимального алгоритма распознавания не входил в задачи текущей разработки и его подбор может стать темой отдельного исследования, в рамках данной работы было проанализировано несколько алгоритмов машинного зрения и архитектур нейронных сетей, предназначенных для выделения движущихся транспортных средств. Для обработки видеоряда использовались программы написанные на языке программирования Python и открытая библиотека компьютерного зрения OpenCV.

При обработке видеофайлов, записанных в дневное время и ясную погоду хорошо показал себя алгоритм выделения движущихся объектов и их контуров. При этом производится поиск пересечения найденных контуров движущихся объектов с контрольной областью [13, 14]. Данный алгоритм отличается высокой скоростью работы и высокой точностью, однако совершенно не подходит для анализа движения в ночное время, так как в контуры движения объектов попадает движение световых пятен фар автомобилей. Кроме того, данный алгоритм выделяет все движущиеся объекты, включая пешеходов, животных и т.д. В рамках решения поставленной задачи эта проблема решается правильным подбором расположения контрольной области, однако в дальнейшем развитии алгоритмов анализа транспортных потоков это может стать существенной проблемой.

Также для анализа видеофайлов, записанных в других условиях, использовалось несколько предобученных вариантов нейронных сетей с архитектурой YOLO, находящихся в свободном доступе. Архитектура YOLO является одной из самых популярных открытых архитектур нейронных сетей, предназначенных для решения задач компьютерного зрения, в том числе решения задач детекции различных объектов на изображении [15, 16]. При достаточном уровне вычислительных ресурсов, нейронные сети, использующие данную архитектуру, позволяют осуществлять детекцию объектов на видеозаписи в режиме реального времени [17].

Найденные в открытом доступе обученные варианты нейросетей с архитектурой YOLO позволили автоматически выделить на видеозаписях контуры легковых автомобилей (объект car), грузовых автомобилей (объект truck) и мотоциклов (объект motorcycle), а также определить пересечение контуров указанных объектов с контрольной областью фиксации.

Несмотря на хорошие показатели детекции объектов, незначительно зависящих от времени съемки и погодных условий, используемые нейронные сети показали и ряд недостатков. Первым недостатком можно считать низкую скорость работы по сравнению с алгоритмом детекции движущихся объектов. Вторым недостатком являются пробелы в детекции – на 3-5 процентах кадров объект не детектируется без видимых причин. Для большинства задач компьютерного зрения (например, контроль нарушений или распознавание «своих» автомобилей) это не является проблемой, однако при решении задачи выделения кадров начала и окончания пересечения автомобилем контрольной области, этот недостаток является существенным и приводит к выделению большого количества некорректных кадров и замедлению их верификации и дальнейшей обработки.

Можно предположить, что нейронные сети, позволяющие добиться наилучших результатов редко выкладываются в свободный доступ и, как правило, являются интеллектуальной собственностью и коммерческой тайной разработчиков.

Это позволяет сделать вывод, что для оптимизации работы необходимо использование коммерческих систем распознавания или разработка обучающих наборов данных и обучение своих моделей нейросетей, оптимальных для решения данной задачи.

3. Загрузка данных – выделенные на предыдущем этапе пары кадров загружаются в специально разработанное программное обеспечение. Результат анализа видеозаписи сохраняется в отдельную папку, в которую выгружаются файлы изображений, содержащие выделенные кадры, и текстовый файл, содержащий данные о них. Файлы изображений имеют имена вида «<номер кадра>.jpg» и содержат выделенные кадры начала или окончания пересечения автомобилями контрольной области. Текстовый файл содержит множество строк, каждая из которых содержит два номера, разделенные пробелом. Первый номер соответствует номеру кадра начала пересечения контрольной области автомобилем, второй – окончание пересечения контрольной области этим же автомобилем.

Сохраненные в указанном формате данные загружаются в разработанное программное обеспечение. Для каждого кадра, кроме самого изображения, сохраняются его номер в видео-ряде, сведения о месте, времени и условиях съемки, сведения о формате и качестве видеозаписи.

Загруженные данные имеют иерархическую структуру: каждый загруженный кадр подчинен сущности «КадрыАвтомобилей» (содержит набор из пар кадров), которая, в свою очередь, подчинена сущности «Замер» (содержит данные об измерении и обработанной видеозаписи).

4. Предварительная обработка загруженных данных. Все загруженные данные проходят ручную верификацию с помощью специально разработанного интерфейса – оператору выводится множество пар кадров, с предполагаемыми началом и окончанием пересечения автомобилем контрольной области. Одновременно выводится не более девяти пар кадров. Оператор может отметить неверно выделенные пары, нажав клавишу с номером пары на клавиатуре или кликнув по ней мышкой. Отмеченные оператором кадры отмечаются как некорректные, выделяются красным цветом и не участвуют в дальнейшей обработке. Переход к следующему набору пар кадров осуществляется нажатием кнопки «Далее» или пробела на клавиатуре. Кроме того, для каждой пары можно установить тип автомобиля, пересекающего контрольную область. Пример интерфейса верификации данных представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Пример интерфейса ручной верификации данных

5. Определение интервалов движения автомобилей – после окончания верификации на основании подтвержденных оператором пар кадров автоматически генерируются данные об интервалах между автомобилями на полосе. Интервал определяется как разница между кадрами начала пересечения контрольной области парой последовательно движущихся автомобилей, но, в зависимости от настроек, алгоритм определения интервала может быть изменен. Для каждого интервала фиксируются данные кадров его начала и окончания (в том числе изображения), а также вычисляется его длина. Длина интервала l вычисляется по следующей формуле (1):

$$l = \frac{k_n^{\text{нач}} - k_{n-1}^{\text{нач}}}{FPS}, \quad (1)$$

где $k_n^{\text{нач}}$ и $k_{n-1}^{\text{нач}}$ – номера кадров начала пересечения контрольной области последовательно движущимися автомобилями; FPS – количество кадров в секунду на видеозаписи.

6. Определение типа интервала – разделение сформированных на предыдущем этапе временных интервалов необходимо для определения граничного интервала, то есть временного интервала, который необходим водителю для начала движения во вторичном направлении. При этом для каждого сформированного интервала с помощью специального интерфейса отмечается его тип – принятый, отказанный или отклоненный.

Интервал определяется как принятый, если на момент его начала на второстепенной дороге был автомобиль, который к его окончанию успел совершить маневр.

Интервал определяется как отказанный, если на момент его начала на второстепенной дороге был автомобиль, положение которого к его окончанию не изменилось (не успел совершить маневр).

Интервал определяется как отклоненный, если его длина превысила пороговое значение 10 секунд или на второстепенной дороге отсутствовали автомобили. Такие интервалы не используются в дальнейшем расчете.

Пример интерфейса, позволяющего определить типы интервалов, представлен на рисунке 3.

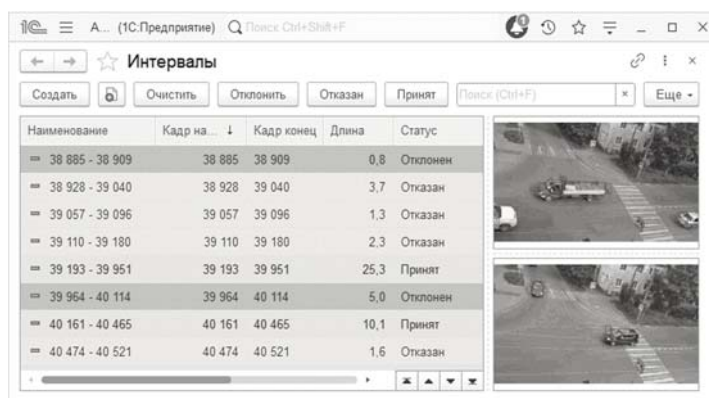
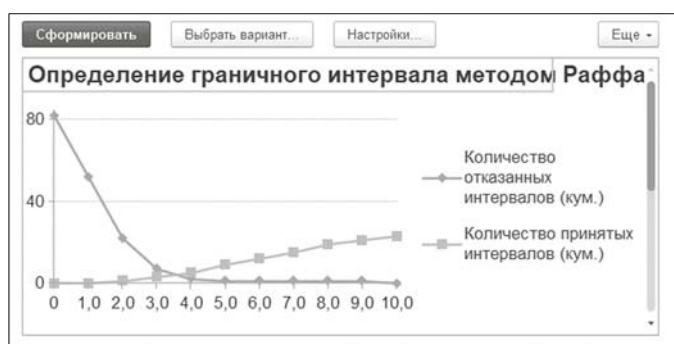


Рис. 3. Пример определения типов интервалов

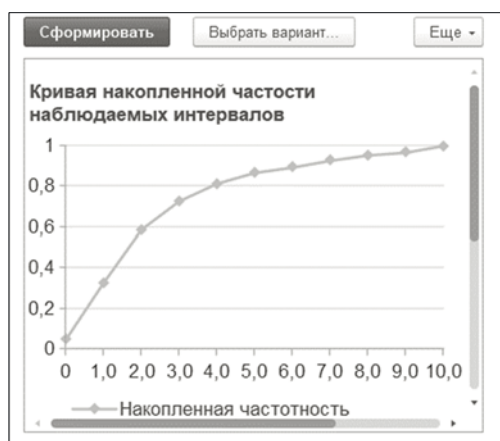
Оператор, переходя с помощью стрелок на клавиатуре между строками отдельных интервалов, просматривает соответствующие этому интервалу кадры в правой части окна, и нажимает одну из трех кнопок «Отклонить», «Отказан» или «Принят», устанавливая соответствующий статус для текущего интервала. Нажатием соответствующей кнопки тип интервала может быть очищен. На все кнопки формы назначены

горячие клавиши, поэтому установку типов интервалов можно осуществлять без использования мыши, что значительно ускоряет работу оператора.

После окончания обработки в системе аккумулируется достаточное количество информации для проведения анализа транспортного потока с использованием различных методик: данные о количестве и составе проезжающего транспорта, данные об интервалах между автомобилями и их типами. На основании собранной информации строятся различные отчеты, в том числе, с графическим представлением информации. На рисунке 4, в качестве примера, представлены график, предназначенный для определения граничного интервала методом Раффа, и график кривой накопленной частоты наблюдаемых интервалов, построенных в программе.



а)



б)

Рис. 4. Примеры графиков, построенных на основании собранных данных: а) – распределение принятых и отвергнутых интервалов; б) – кривая накопленной частоты наблюдаемых интервалов

Обсуждение и выводы

Результаты пробных измерений характеристик движения транспортных потоков при помощи разработанного инновационного программного обеспечения, позволяющего на основе машинного зрения обеспечивать обработку данных о характеристиках транспортных потоков показали, что использование такого программного обеспечения позволяет значительно упростить и ускорить процесс сбора и обработки информации для анализа транспортных потоков городов России. Так, для обработки данных видеозаписи длительностью 15 минут потребовалось в среднем 11 минут 42 секунды, в том числе 4 минуты 40 секунд на верификацию кадров и

7 минут 02 секунды – на определение типов интервалов между автомобилями. Ручное внесение результатов натурных наблюдений потребовало значительно больше времени – не менее 20 минут на ввод данных и их дальнейшую обработку. Данные обработки сохраняются в программе, могут быть легко перепроверены, а также проанализированы с использованием различных методов и алгоритмов.

Со временем, накопление в системе определенного массива данных и хранение в системе дополнительной информации о проводимых измерениях, позволят значительно расширить возможности исследователей при проведении анализа. Накопление информации о месте проведения замера позволит проводить анализ каждого места изменения в различное время суток, время года и в различные погодные условия. Хранение информации о времени замера и погодных условиях позволит проводить комплексный анализ особенностей движения транспортного потока в зависимости от этих параметров.

На основании сохраняемых в системе данных может быть в дальнейшем подготовлен качественный набор данных, позволяющий провести обучение собственных нейронных сетей, решающих задачу измерения характеристик транспортных потоков в автоматическом режиме.

Благодарности

Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Интеллектуальные системы управления развитием улично-дорожной сети городов»; код научной темы, присвоенной учредителем – FEFG-2024-0005.

Литература

1. Mingzhi Zhang, Zhaocheng Li, Hongyun Si, Long Cheng, Xiangyu Zhou, Bowen Wang. Urban Travel Time and Residential Location Choice: The Impacts of Traffic Congestion // *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 99. ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.10497>
2. Peng Nie, Alfonso Sousa-Posa. Commute Time and Subjective Well-being in Urban China // *China Economic Review*. 2018. Vol. 48. ISSN 1043-951X. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2016.03.002>
3. Louafi Bouzouina, Ioannis Baraklianos, Patrick Bonnel, Hind Aissaoui. Renters vs Owners: The Impact of Accessibility on Residential Location Choice: Evidence from the Lyon Urban Area, France (1999-2013) // *Transport Policy*. 2021. Vol. 109, pp. 72-84. doi: 10.1016/j.transpol.2021.05.022.
4. Nathaniel Baum-Snow. Suburbanization and Transportation in a Monocentric Model // *Journal of Urban Economics*. 2007. Vol. 62. No. 3, pp. 405-23. doi:10.1016/j.jue.2006.11.006
5. Michael L. Anderson, Fangwen Lu, Yiran Zhang, Jun Yang, Ping Qin. Superstitions, Street Traffic, and Subjective Well-Being // *Journal of Public Economics*. 2017. Vol. 142. ISSN: 0047-2727. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2017.09.005>
6. Garg T., Kaur G. A Systematic Review on Intelligent Transport Systems // *Journal of Computational and Cognitive Engineering*. 2023. Vol. 2. No. 3, pp. 175-88. doi: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE202245>.
7. Autili M., Chen L., Englund C., Pompilio C., Tivoli M. Cooperative intelligent transport systems: choreography-based urban traffic coordination // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021. No. 22(4), pp. 2088-2099. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3059394>

8. *Kostcov A.V.* Investigation of the length of sections of influence of entrances to multilane highways // *Science and technology in the road industry*, 2019. No. 1(87), pp. 20-21.

9. *Martyakhin D.S., Komarova T.K.* Study of capacity of U-turn lanes at regulated intersections // *Science & technology in roads & bridges*, 2020. No. 2(96), pp. 31-33.

10. *Komarova T.* Mathematical modeling of car and pedestrian traffic at unregulated junctions // *Izvestiya KSASU*, 2021. No. 3(65), pp. 163-174. doi: 10.52409/2073-1523-2022-65-163

11. *Mikhailov A., Golovnykh I.* Modern trends in the design and reconstruction of urban street and road networks. Novosibirsk: Nauka, 2024. 267 p.

12. *Pospelov P.I., Kostin S.V., Nemchinov D.M., et al.* Designing streets and roads in cities and urban districts. Moscow: Publishing House "Petropolis", 2022. 232 p.

13. *Zivkovic Z. van der Heijden F.* Efficient Adaptive Density Estimation per Image Pixel for the Task of Background Subtraction // *Pattern Recognition Letters*, 2006. Vol. 27. No. 7, 2006, pp. 773-780.

14. *Ngo H.H.* Vehicle-detection-based traffic density estimation at road intersections // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Vol. 11. No. 7, pp. 39-46.

15. *Terven Ju., Córdova-Esparza D.M., Romero-González Ju.A.* A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: from YOLO v1 to YOLO v8 and YOLO-NAS // *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5. No. 4, pp. 1680-1716.

16. *Darmadi Doni H.N.* Traffic counting using YOLO version-5 (a case study of Jakarta-Cikampek toll road) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1321. No. 1, pp. 012-015.

17. *Rani N.G., Priya N.H., Ahilan A., Muthukumaran N.* LV-YOLO: Logistic vehicle speed detection and counting using deep learning based YOLO network // *Signal, Image and Video Processing*. 2024. Vol. 18. No. 10, pp. 7419-7429.

THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR AUTOMATED PROCESSING OF TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY OF TRANSPORT SERVICES FOR THE URBAN POPULATION

Roman V. Klyuev, SKGMI (GTU)", Vladikavkaz, Russia

Aleksey V. Kostsov, SKGMI (GTU), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, kostsov_msfs@bk.ru

Alexander Z. Dobaev, SKGMI (GTU), Vladikavkaz, Russia

Astemir M. Tlekhugov, SKGMI (STU), Vladikavkaz, Russia

Kamilla M. Khabaeva, SKGMI (STU), Vladikavkaz, Russia

Abstract

Modern trends in the development and transformation of urban environments are intrinsically linked to the adoption of advanced computer technology. Improving living conditions for city dwellers is a complex, multifaceted task, with the most significant component being the establishment and maintenance of modern transportation infrastructure that supports urban mobility. In this context, it is essential to update information regarding traffic flow and methods for calculating parameters of street and road networks in Russian cities. Measuring individual characteristics of traffic flows, such as the number and types of passing vehicles, average speed, etc., can now be carried out automatically using modern technical systems, including measuring instruments and specialized software. The calculation of other characteristics, for example, boundary time intervals when crossing traffic flows, is carried out solely on the basis of field measurements and requires significantly more resources. The article explores innovative software that allows automated collection of data on the characteristics of traffic flow, including characteristics that have not previously been measured automatically. This is particularly significant for updating methods for estimating capacity of street and road elements as a basis for implementing measures to enhance transportation services for urban populations.

Keywords: measurement of traffic intensity, traffic flows, video sequence analysis, computer vision.

References

- [1] Mingzhi Zhang, Zhaocheng Li, Hongyun Si, Long Cheng, Xiangyu Zhou, and Bowen Wang, "Urban Travel Time and Residential Location Choice: The Impacts of Traffic Congestion," *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 99. ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.10497>
- [2] Peng Nie and Alfonso Sousa-Posa, "Commute Time and Subjective Well-being in Urban China," *China Economic Review*. 2018. Vol. 48. ISSN 1043-951X. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2016.03.002>
- [3] Louafi Bouzouina, Ioannis Baraklianos, Patrick Bonnel, and Hind Aissaoui, "Renters vs Owners: The Impact of Accessibility on Residential Location Choice: Evidence from the Lyon Urban Area, France (1999-2013)," *Transport Policy*, 2021. Vol. 109, pp. 72-84. doi: 10.1016/j.tranpol.2021.05.022.
- [4] Nathaniel Baum-Snow, "Suburbanization and Transportation in a Monocentric Model," *Journal of Urban Economics*, 2007. Vol. 62. No. 3, pp. 405-23. doi:10.1016/j.jue.2006.11.006
- [5] Michael L. Anderson, Fangwen Lu, Yiran Zhang, Jun Yang, and Ping Qin, "Superstitions, Street Traffic, and Subjective Well-Being," *Journal of Public Economics*. 2017. Vol. 142. ISSN: 0047-2727. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2017.09.005>
- [6] T. Garg and G. Kaur, "A Systematic Review on Intelligent Transport Systems," *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 2023. Vol. 2. No. 3, pp. 175-88. doi: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCE202245>.
- [7] M. Autili, L. Chen, C. Englund, C. Pompilio, M. Tivoli, "Cooperative intelligent transport systems: choreography-based urban traffic coordination," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, no. 22(4), pp. 2088-2099. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3059394>
- [8] A. V. Kostcov, "Investigation of the length of sections of influence of entrances to multilane highways," *Science and technology in the road industry*, 2019, no. 1(87), pp. 20-21.
- [9] D. S. Martyakhin, T. K. Komarova, "Study of capacity of U-turn lanes at regulated intersections," *Science & technology in roads & bridges*, 2020, no. 2(96), pp. 31-33.
- [10] T. Komarova, "Mathematical modeling of car and pedestrian traffic at unregulated junctions," *Izvestiya KSASU*, 2023, no. 3(65), pp.163-174. doi: 10.52409/2073-1523-2022-65-163
- [11] A. Mikhailov, I. Golovnykh, "Modern trends in the design and reconstruction of urban street and road networks," Novosibirsk: Nauka, 2004. 267 p.
- [12] P. I. Pospelov, S. V. Kostin, D. M. Nemchinov, et al., "Designing streets and roads in cities and urban districts," Moscow: Publishing House "Petropolis", 2022. 232 p.
- [13] Z. Zivkovic, F. van der Heijden, "Efficient Adaptive Density Estimation per Image Pixel for the Task of Background Subtraction," *Pattern Recognition Letters*, 2006. Vol. 27, No. 7, 2006, pp. 773-780.
- [14] H. H. Ngo, "Vehicle-detection-based traffic density estimation at road intersections," *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 11. No. 7, pp. 39-46.
- [15] Ju. Terven, D. M. Cordova-Esparza, Ju. A. Romero-Gonzalez, "A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: from YOLO v1 to YOLO v8 and YOLO-NAS," *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5. No. 4, pp. 1680-1716.
- [16] Darmadi, H. N. Doni, "Traffic counting using YOLO version-5 (a case study of Jakarta-Cikampek toll road)," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1321. No. 1, pp. 012-015.
- [17] N. G. Rani, N. H. Priya, A. Ahilan, "Muthukumaran N.(2024). LV-YOLO: Logistic vehicle speed detection and counting using deep learning based YOLO network," *Signal, Image and Video Processing*. 2024. Vol. 18. No. 10, pp. 7419-7429.

Information about authors:

Roman V. Klyuev, Doctor of technical sciences, Professor, Head. Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SKGMI (GTU)", Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia

Aleksey V. Kostsov, Ph.D., Professor, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SKGMI (GTU)", Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia;

Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)", Moscow, Russia

Alexander Z. Dobaev, Senior lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SKGMI (GTU)", Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia

Astemir M. Tlekhugov, Junior Researcher, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SKGMI (STU)", Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia

Kamilla M. Khabaeva, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SKGMI (STU)", Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia

COMPLEX CAMERA CHARACTERISTICS ASSESSMENT THROUGH SFR ANALYSIS

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-45-52

Dmitry A. Egorov,
Moscow Technical University of Communications
and Informatics, Moscow, Russia, d.a.egorov@mtuci.ru

Andrei V. Balobanov,
Moscow Technical University of Communications
and Informatics, Moscow, Russia, andrey_sam@mail.ru

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

Manuscript received 12 January 2025;
Accepted 10 February 2025

The study was supported by a grant from the Russian
Science Foundation No. 23-29-00302,
<https://rscf.ru/project/23-29-00302/>

Keywords: Modulation Transfer Function, Closed-circuit
television, security camera, image quality

An important step in selecting closed circuit television systems (CCTV) TV camera is evaluation of resolution capabilities of available options, because this parameter is most important one in set that defines ability of external or auxiliary systems to detect and recognise objects and events on camera video feed. Knowledge of the camera modulation transfer function is essential for building robust CCTV to detect and identify threats. Various approaches to extract MTF slope can be used, but some peculiar properties of cameras that used in this area (like closed access to raw images, un ability to fully disable onboard extensive image processing) is making traditional approaches less applicable in stand alone mode, so combination is required to confidently qualify characteristics of camera samples. In this paper we describe protocol and automation means that can accelerate measurements procedures, making them more robust too. Presented results also highlight possible directions of further research.

Для цитирования:

Егоров Д.А., Балобанов А.В., Строганова Е.П. Комплексная оценка характеристик камеры посредством анализа пространственно-частотного отклика // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 45-52.

For citation:

D. A. Egorov, A. V. Balobanov, E. P. Stroganova, "Complex camera characteristics assessment through SFR analysis," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 45-52.

Introduction

The significance of surveillance system in enhancing public safety and security cannot be overstated, as they serve as indispensable tools for crime prevention, traffic monitoring, and property protection. As urban areas continue to expand and evolve, the demand for robust and reliable surveillance solutions has intensified, prompting innovations in camera technology. In recent years, the landscape of closed-circuit television (CCTV) security systems has undergone significant transformations, driven by advancements in imaging technology and artificial intelligence (AI). The emergence of system-on-a-chip (SoC), equipped with onboard neural processing units (NPU), has further revolutionised CCTV systems by facilitating AI processing at the edge. This development allows for real-time analysis and decision-making within the camera itself, reducing latency and bandwidth requirements. Moreover, the synergy between edge AI and cloud-based AI systems enhances the precision and robustness of detection models, which rely on high-quality images for optimal performance. This article focuses on comparison and evaluation of the modulation transfer function (MTF) measurement by different methodologies in real world scenarios, providing toolset to compare real characteristics of cameras despite image pipeline of camera that enhances perceived quality. MTF is critical parameter in assessing image quality and system performance because it represent detailization of objects in frame, showing potential performance of manual and automated analysis of image [13].

One of the most notable advancements in the realm of CCTV is the mass adoption of high-resolution sensors, such as 8-megapixel (MP) and 12MP sensors. These sensors offer superior image clarity, enabling more accurate identification and recognition of subjects within the surveillance footage. Additionally, the integration of high dynamic range (HDR) capabilities allows cameras to capture detailed images in challenging lighting conditions, improving the overall effectiveness of surveillance systems. But some manufactures not paying enough attention to camera optics characteristics prioritising economical characteristics, which significantly reduces gains from high resolution sensors.

As the adoption of advanced CCTV technologies continues to grow, the importance of MTF measurement for ensuring image quality becomes increasingly critical [18]. Accurate MTF assessments enable integrators and service companies to evaluate performance of available models, ensuring that they meet requirements and can be used with advanced AI models for functionality expansion [1].

Modern revision of ISO12233:2024 standard suggests to use eSFR methodology which is pretty robust and versatile especially in case of availability of raw image from device under test [9, 15, 16]. But test cases in area of CCTV camera often imply that camera is closed system and all measurements should be evaluated with blackbox approach. As suggested in previous research [1] results from traditional edge based methods can be augmented with random pattern MTF estimation techniques, providing deeper insight in image processing pipeline of device under test.

Objectives

Compare MTF characteristics of various CCTV cameras to develop framework for objective characteristic evaluation of CCTV cameras and highlight problems and characteristics that Intrinsic to CCTV cameras.

Related work

Spatial frequency responses can be extracted from multiple test patterns. First and most wide adopted approach is to use slanted edge methods which is widely adopted in ISO 12233 standard line. Edge SFR extraction approach was proposed in 1960s [6] is based on the fact, that if we have edge at shallow angle, we can recalculate coordinates of image samples, such that edge is aligned with one of the axis, providing oversampled edge, so SFR can be extracted up to sampling spatial frequency. This method requires target with a sharp transition (edge) at an oblique angle (usually 6° to 8°) is captured by the imaging system, position and intensity of this edge are analysed across multiple lines [2, 3, 8].

Since the edge is not perfectly orthogonal to the sampling grid, corrections are applied to align the edge with the grid axes. Then oversampled edge sequence is averaged in quarter pixel bins to reduce overall noise and numerical differentiation is applied to extract line spread function from the edge, windowing is also applied to reduce high frequency part distortion, due to breaks on the end of LSF estimation. But main problem is that in recent years computational photography methods had been implemented in various device types including CCTV cameras [1, 4, 12].

Simple structures may be easily restored, so additional validation steps are required. And extensive sharpening makes it difficult to extract real MTF characteristics from samples in black box testing approach. To overcome this issue noise based random test sequences can be used. They provide a way to evaluate ability of a camera to properly capture texture surfaces. This is impotent characteristic if we are talking about busy scenes where we have a lot of objects at different scales.

If simple sharpening is applied in extensive amount its effect can be estimated by peaks of gibbs artefact amplitude compared to peak of line spread function, typically its level not greater than -15db, but some cameras image signal processor (ISP) can push its level up to -17db especially in low light conditions (Fig. 2) highlighting edge structure with hi contrast sharp gradients. The effect is demonstrated on pseudo color [21-23] visualisation of differentiated edge below (Fig.1), which provide clear way to roughly estimate ringing along the edge (white haloing) and video compression coder imperfections (blocking effect), which is considered as noise in current approach.

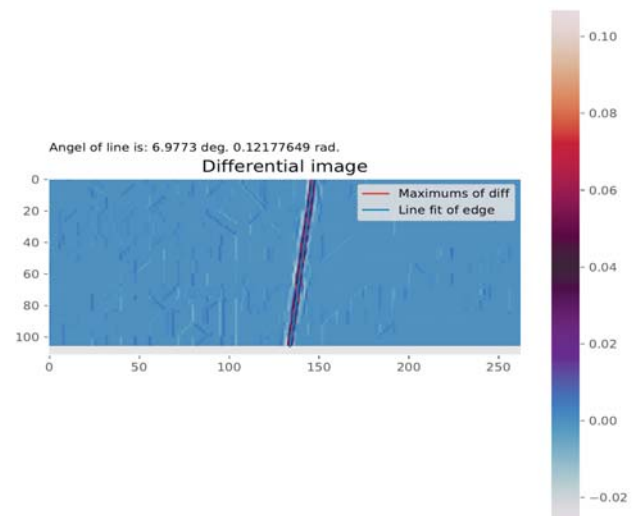


Fig. 1. Line spread visualisation in pseudocolours



Fig. 2. Line spread function visualisation with averaging

Second "spilled coins" method for estimating MTF involves capturing images of circles with different lightness and size placed in a way that they overlap and create a visually complex pattern. By controlling size and lightness of circles we can achieve certain spectral slope ($1/f$ in most cases to mimic natural scenes spatial frequency content). The resulting image can then be analysed to determine the MTF, by comparing divisions from designed slope. Main disadvantage of this method, in context of CCTV cameras is that it is sensitive to sharpening, and have artificially reconstructable pattern, so it is not practical to use this approach in CCTV field.

Third option is noise method, it is a technique used to estimate the MTF of imaging systems in same paradigm as spilled coins approach, but target is have purely textural nature. It involves creation of this type of pattern by generating random phase spectrum combining it with amplitude spectrum with $1/f$ spectral slope and then applying inverse fourier transform, which produces required pattern [7]. It has noise appearance, so aggressive noise reduction pipelines, sometimes suppress hi spatial frequencies. But limited MTF estimation range and unavailability to robustly estimate signal to noise ratio, do not allow stand alone usage of this technique. This method had been evaluated in previous research to determine computational pipeline robustness and ability to precisely estimate MTF slope. Results showed low precision on low frequency, but overall error level is suitable for comparison of imaging systems and human visual system sensitivity for low spatial frequency is low according to latest research [17]. And reference juxtaposition of results from noise and slanted edge approach highlights samples with artificial image enhancements like adaptive sharpening.

The noise method offers a practical approach to estimating the MTF of imaging systems by leveraging the modulation effects of random noise. This technique is valuable for understanding how different spatial frequencies are handled by the system, which is crucial for tasks such as image reconstruction and quality control [20].

To fully qualify samples following tooling and protocol was developed: two test targets, with high contrast slanted edge (Fig. 3), low contrast slanted edge (Fig. 4) provide MTF estimation using ISO 12233 methodology, and pink noise target (Fig. 5) provides a way for texture resolution capabilities assessment. In our experiments we used CCTV cameras, that typically have poor performance compared to professional cameras, high and medium range

semi-professional cameras. In harsh noise conditions, especially in low light [10,11], high contrast methods provide smoother MTF. Sometimes video encoder performance of samples cameras is not great and have sensible amount of blocking artefacts, in such conditions high contrast slanted edge method is preferred too, and provide good reference for low contrast measurement results, verifying gathered results. Third method is based on noise with amplitude spectrum shaped as $1/f$ slope, which is typical for natural scenes [19] amplitude spectrum and provides means to evaluate texture performance.



Fig. 3. High contrast Slanted edge pattern with ArUco alignment markers and OECF estimation regions

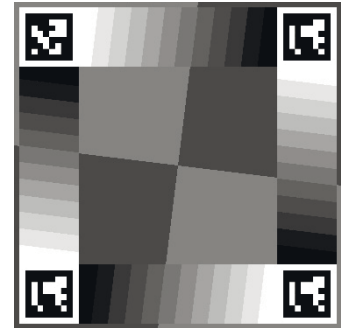


Fig. 4. Low contrast Slanted edge pattern with ArUco alignment markers and OECF estimation regions

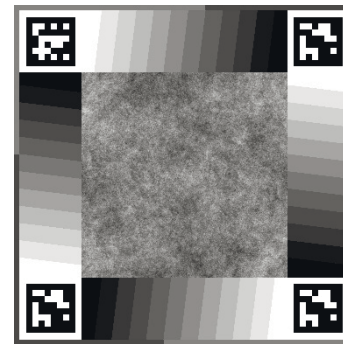


Fig. 5. Noise pattern with ArUco alignment markers and OECF estimation regions

One of the key component to improve MTF measurement consistency is test target processing automation [5]. To provide automated tooling for recognition and test target extraction ArUco marker was chosen as they prove resilient over time, have great performance and simple API in OpenCV library. To prevent and detect geometric distortion, increase detection reliability 4 markers was placed at corners of test target.

Other important characteristic that needs to be extracted before MTF estimation is opto electrical transfer function (OETF). To estimate this function 12 grayscale strips was placed on the edges, reflectivity of each strip was tested with spectrophotometer in emissive measurement mode to ensure results precision. By analysing registered lightness values against measured reflectivity coefficient inversion gamma correction transformation function can be calculated. Slight rotation was introduced for future work, to compute low contrast MTF and ringing level as function of brightness.

This element also provides means to calculate signal to noise ratio at different lightness levels, duplicating pattern four times provides more reliable way to estimate OECF and signal to noise

ratio by increasing measurement sample size. To evaluate performance in different lighting conditions, 3 levels of lighting was chosen 1000, 100, 10 lumen. It is sufficient for detecting poor light performance and covers typical lighting conditions for CCTV camera as values above and below this range not typical for installation environments. Infra red illumination is typically triggered before signal to noise ratio becomes too bad, and MTF evaluation in conditions of no visible light is beyond the scope of this research.

Thirty two camera samples was gathered for evaluation. All samples have ether dome or bullet form factor, have fixed or variable focal length non replaceable optical system. For legal reasons brands and models are hidden but they can be provided on request under NDA agreement.

To compare samples characteristics following table was created:

Table 1

Measured characteristics of camera samples

	TVL_1	TVL_2	TVL_3	NATIVE_TV_L	RINGING_x100	SNR_1	SNR_2	SNR_3	DR
CAM_0	1010	970	1020	1080	372.27	31.12	31.91	31.98	35.97
CAM_1	1040	1030	1010	1080	376.73	33.56	34.2	33.5	36.64
CAM_2	950	910	940	1080	588.57	34.98	36.47	36.52	36.97
CAM_3	950	910	990	1080	378.07	36.79	35.29	35.67	36.93
CAM_4	940	900	920	1080	561.78	32.29	32.92	33.01	43.94
CAM_5	1790	1710	1730	2160	598.56	29.47	28.33	29.08	33.85
CAM_6	1540	1480	1510	1620	317.55	30.5	33.48	29.95	36.18
CAM_7	750	780	570	1440	400.48	27.82	31.26	31.3	50.25
CAM_8	940	900	910	1056	361.79	29.96	29.85	31.35	33.47
CAM_9	1130	1130	1120	1520	728.57	30.99	30.65	30.82	45.24
CAM_10	990	1060	980	1080	868.8	33.16	31.93	31.51	30.03
CAM_11	460	990	900	1080	488.17	25.91	25.73	27.52	48.55
CAM_12	1080	1080	1080	1080	743.76	22.7	23.34	24.17	39.85
CAM_13	1870	1840	1830	1944	1097.25	28.61	28.77	28.79	34.44
CAM_14	1640	1660	1670	1944	504.75	32.18	31.93	32.53	33.18
CAM_15	1080	1080	1080	1080	365.44	22.71	22.15	21.5	37.5
CAM_16	1930	1944	1910	1944	867.88	30.4	30.11	29.46	44.58
CAM_17	1100	1140	1170	1620	260.09	27.41	25.49	27.1	30.73
CAM_18	1590	1570	1610	1620	379.71	30.39	32.46	32.25	33.66
CAM_19	1620	1620	1620	1620	516.29	28.23	28.51	28.78	28.47
CAM_20	1080	1080	1080	1080	402.31	32.8	33.11	31.1	36.2
CAM_21	890	750	860	1440	430.51	24.54	26.71	25.56	44
CAM_22	1390	1370	1310	1520	603.64	27.11	27.34	26.74	35.7
CAM_23	1490	1440	1420	1520	1223.17	28.71	28.7	27.08	34.53
CAM_24	600	570	620	1080	1068.23	34.15	34.22	35.84	39.01
CAM_25	1080	1080	1080	1080	345.14	34.1	33.91	33.71	37.79
CAM_26	1080	1080	1080	1080	555.61	32.35	33.5	32.94	39.58
CAM_27	1080	1080	1080	1080	469.75	32.52	32.61	32.8	35.84
CAM_28	280	1440	290	1440	245.22	30.61	33.58	31.51	34.67
CAM_29	620	600	620	1080	1028.97	32	35.28	35.38	36.63
CAM_30	630	620	640	1080	1014.04	34.6	34.71	34.6	39.58
CAM_31	1080	1080	1080	1080	433.33	28.47	27.4	28.6	35.47

In table above (tb.1) TVL_1 is resolution in television lines of full width half modulation at 10lux illuminance of test target, and TVL_2, TVL_3 corresponds to 100 and 1000 lux. NATIVE_TV_L is resolution of imaging sensor,

RINGINGx100 is ratio of ringing amplitude to line amplitude multiplied by 100 (for visualisation purposes). SNR_1, SNR_2, SNR_3 is mean signal to noise ratio at 10, 100, 1000 lux illuminance respectively. DR is estimated dynamic range on reflective test target at 1000lux.

Over all overlapped MTF in frequency range normed to sample frequency (for visualisation and comparison purposes) gathered from high and low contrast slanted edge demonstrated on Figures 6, 7.

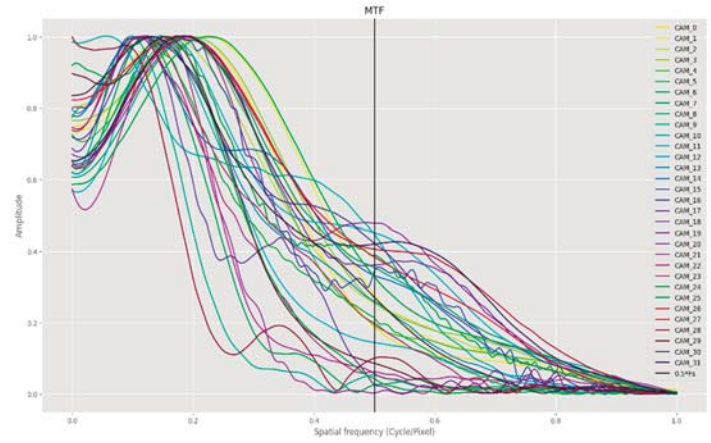


Fig. 6. All samples MTF from hig contrast target

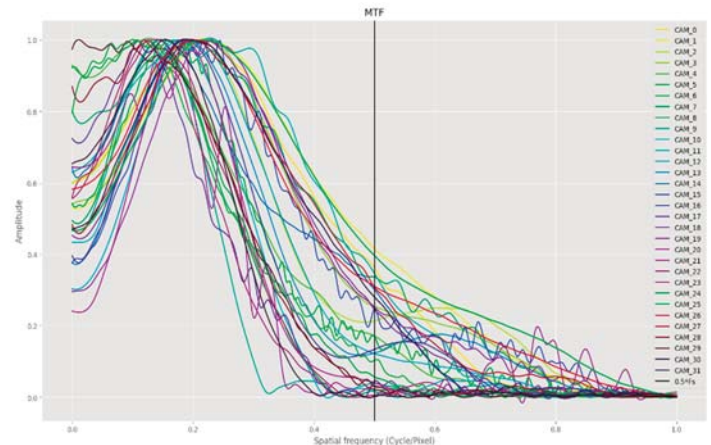


Fig. 7. All samples MTF from low contrast target

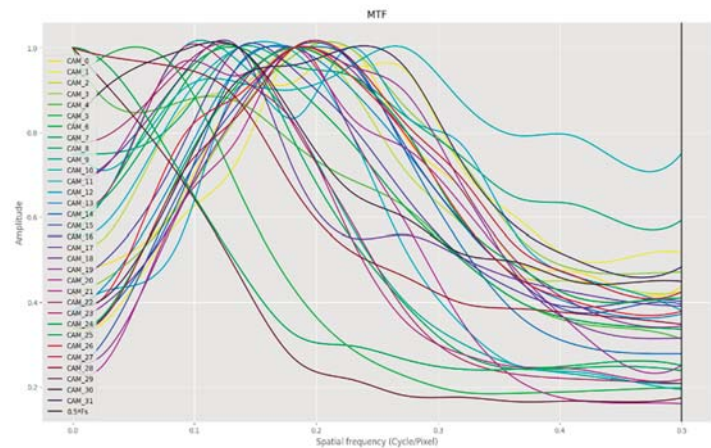


Fig. 8. All samples MTF from noise target

As samples have quit different characteristics and target use cases, they was splitted in to 3 grades by native resolution of image sensor. Zero grade contains cameras with resolution greater than 1700 TVL, first grade is all samples with resolution above 1080 TVL and second grade is 1080 TVL (This resolution is typical for 2mp cameras and often considered minimal by modern technical requirements for CCTV system)

To properly assess samples, let's visualise each grade MTF separately, for more relevant insights.

The grade visualised on (Fig. 9) contains samples with 8mp and 5mp camera samples, typically devices this devices advertise as hi end solutions, have superior lens quality and more auxiliary features. As expected for small imaging sensors with very high pixel density, MTF attention begins at approximately 0.2 of sampling frequency and progress rapidly toward half of sampling frequency especially in low light conditions. MTF correlation with lighting conditions is more noticeable on hi resolution samples with advanced ISP onboard.

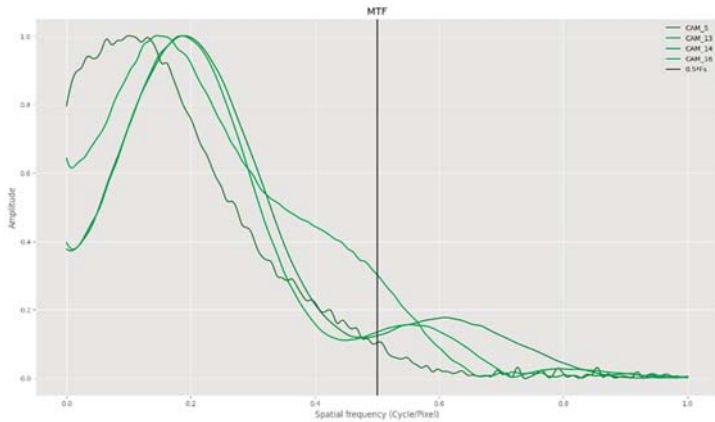


Fig. 9. Grade 0 samples MTF from low contrast target

On visualisation of grade 1 samples (Fig. 10) we are observing samples with 4mp sensors. Overlapped MTF visualisation, shows significant spread of low and high frequency content. Main insight that clearly visible is peak shifting towards high frequency with reduction of DC component and low frequency. This means that different strategies used by vendors to visually boost image quality. Some times vendors uses extremely aggressive ISP pipeline with significant sharpening, which is proven by ringing levels and Noise based MTF shape.

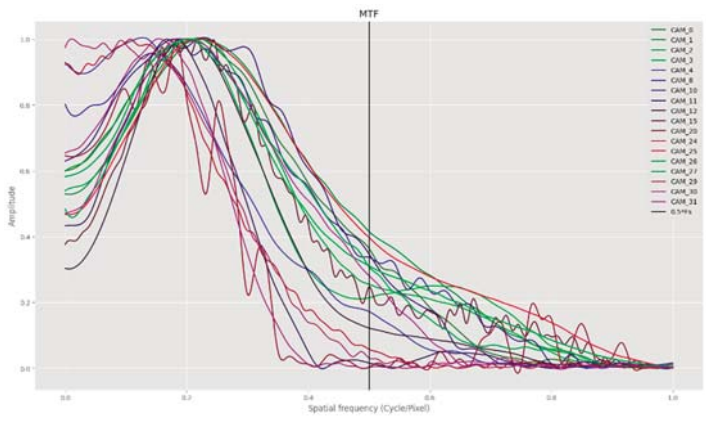


Fig. 10. Grade 1 samples MTF from low contrast target

Figure above (Fig. 11) contains largest number of samples, and show significant performance variation of base models from different vendors. Due to cost efficiency and typical minimum system requirements and this models have highest installation rate. So testing importance is highest in this category, because of large quantity variation. Only way to create future prof system is to select models with best possible performance among base models.

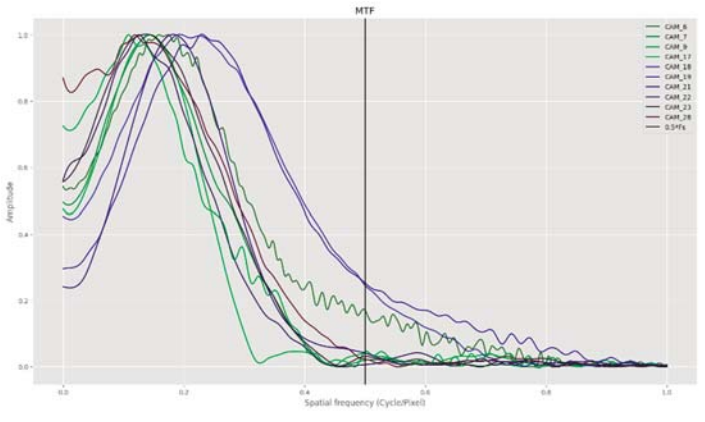


Fig. 11. Grade 2 samples MTF from low contrast target

Significant drop in resolution is common to samples in grade 0 (Fig. 12), probably happening due to poor optic quality. From figures (Fig. 13, 14) we can conclude that native resolution of camera sensor, does not fully represent camera resolution ability, and testing evaluation is crucial for choosing best model among available.

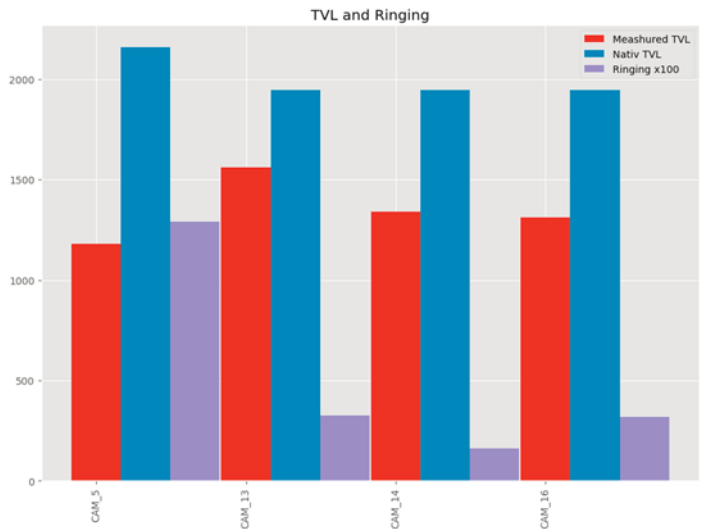


Fig. 12. Grade 0 LSF and ringing compare

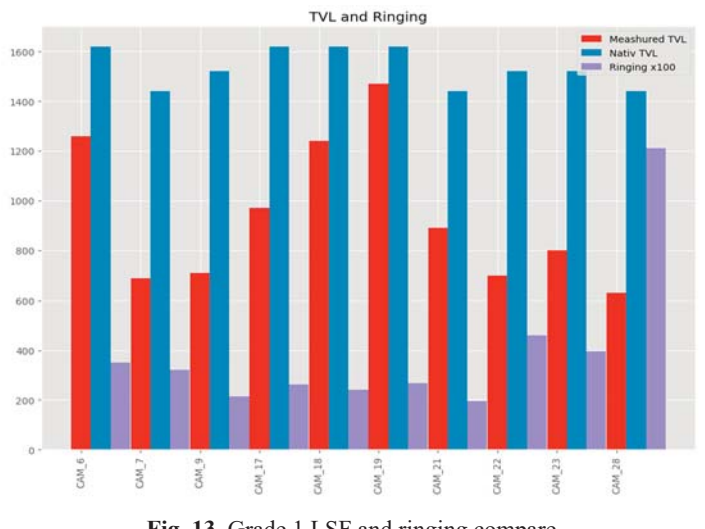


Fig. 13. Grade 1 LSF and ringing compare

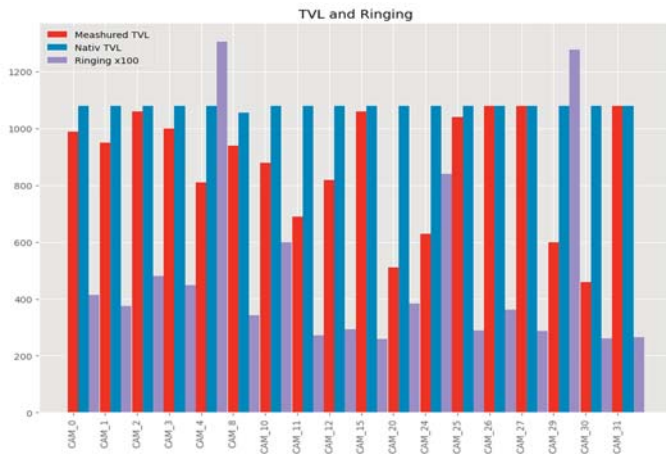


Fig. 14. Grade 2 LSF and ringing compare

Results

2MP cameras from second grade use image signal processing intensely to mask out poor optical resolution of lenses used in that models because this models are typically limited by budget, low sensor noise performance is sometimes masked by adaptive noise reduction algorithms that have quiet significant hi spatial frequency content attenuation, that can be spotted by analysing MTF from different test targets proposed in protocol above. Cameras from first two grades as shown above have much shallower spectral slope. This is strong evidence that main limitation of small form factor camera is optical system, while full width at half modulation of line spread function is noticeably wider.

Over all this review shows current state and limitation in different segments of CCTV camera market, and provides useful insights for system design, highlighting importance of testing procedure, to make right choice of supplier by correct price to value estimation based on objective criteria. All sample have noticeable amount of sharpening in image processing pipeline, LSF have sensible ringing on the edge. This phenomenon is probably happening due to marketing consideration and effect on human visual system in typical multi-view installation should be evaluated, because of possible masking effect can be happening, reducing threat recognition performance of security personnel.

Conclusion

This paper shows significant of testing procedures before choosing CCTV cameras, but current procedures have some limitations and does not provide methods to choose between similar samples. Further research should be carried out to implement hybrid methodology (to extract MTF up to sampling frequency, from noise based patterns reliably). Low contrast MTF against lightness offset analysis seems to be perspective, and planned to be researched. Advances in ISP onboard pipeline brings more threads to CCTV cameras consumers as visually appealing picture can miss critical details due to poor hardware performance. This further amplifies significance of testing procedure especially for standard projects and large scale deployments, to maximize system capabilities.

Acknowledgment

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00302, <https://rscf.ru/project/23-29-00302/>

[1] D. A. Egorov, V. D. Fedorov, I. V. Vlasuyk, A. M. Potashnikov and A. I. Mozhaeva, "A Novel Method for Estimating the Spatial Frequency Characteristics of Cameras Based on Generative Random Sequences," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744396.

[2] P. D. Burns and D. Williams, *Camera Resolution and Distortion: Advanced Edge Fitting*, Proc. IS&T International Sym. on Electronic Imaging, Image Quality and System Performance XV, IQSP-171, 2018.

[3] K. Masaoka, "Accuracy and Precision of Edge-based Modulation Transfer Function Measurement for Sampled Imaging Systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41079-41086, 2018.

[4] I. Vlasuyk, "Method of controlling the spatial characteristics of television cameras," *Metrologic and measuring equipment in communication*, vol. 6, pp. 13, 2005.

[5] Sarah Kerr, "Recommendations For the Detection and Analysis of the ISO 12233:2023 e-SFR Slanted Star." *Electronic Imaging*, 2024, pp. 271-1 - 271-6, <https://doi.org/10.2352/EI.2024.36.9.IQSP-271>

[6] R. A. Jones, "An Automated Technique for Deriving MTFs from Edge Traces," *Photogr. Sci. Eng.*, 1967, no. 11, pp. 102-106. J. C. Dainty and R. Shaw, Image Science, Academic, NY, ch.

[7] Sasaki Shizuki, Masaoka Kenichiro, Koike Yasuhiro, 38-3: Design of Random Depolarization Films Based on Modulation Transfer Function Measurements. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2023. 54. 547-550. 10.1002/sdtp.16615.

[8] D. Williams and P. D. Burns, "Low-frequency mtf estimation for digital imaging devices using slanted edge analysis," *SPIE-IS&T EI Symp.* 5294, pp. 93-101, 2004.

[9] ISO 12233:2024, Photography – Electronic Still Picture Imaging – Resolution and Spatial Frequency Responses. ISO, 2024.

[10] K. Ponomarenko, D. Egorov, V. Kudryashov, A. Egorova, I. Vlasuyk, "Impact of Camera Characteristics and Settings on Precession of AI Object Recognition Models," *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496772.

[11] D. Lee et al., "Precision and characteristics of satellite spatial quality estimators' measurement using an edge target imaged with KOMPSAT-3A," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 24, p. 4660, 2024. DOI: 10.3390/rs16244660.

[12] P. Müller, A. Braun, "MTF as a performance indicator for AI algorithms?" *J. Electron. Imaging*, vol. 35, no. 16, pp. 125-121, 2023. DOI: 10.2352/EI.2023.35.16.AVM-125

[13] Masaoka Kenichiro, "Enhancing Accuracy and Precision in Omni-Angle Edge-Based Modulation Transfer Function Measurements," *IEEE Access*, 3035. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2025.3532119.

[14] Amilia Riska, Anam Choirul, Mahdi, Karrar Naufal, Ariij Dougherty Geoff., "Evaluation of the edge profile shifting based on statistical approach to improve the edge-based MTF measurement," *Jurnal Technology*, 2024.

[15] Fan Yuan-Peng, Wei Lei, Wang Yu-Hao, Hu, Zi-Qiang & Li, Lin. (2023). Improved method for modulation transfer function measurement of Bayer color cameras. *Applied Optics*. 62. 10.1364/AO.504655.

[16] Park Daesoon, Yoo Daehoon, "Precision and Characteristics of Satellite Spatial Quality Estimators' Measurement Using an Edge Target Imaged with KOMPSAT-3A," *Remote Sensing*. 2024. No. 16. 4660. 10.3390/rs16244660.

[17] Anastasia Mozhaeva, Michael J. Cree, Robert J. Durrant, Igor Vlasuyk, Aleksei Potashnikov, Vladimir Mazin, Lee Streeter, "A contrast sensitivity model of the human visual system in modern conditions for presenting video content," *PLOS ONE*, 2024. 19(5): e0303987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303987>.

[18] I. V. Vlasuyk, A. M. Potashnikov, A. V. Balobanov and V. D. Fedorov, "Estimation of Efficiency of Video Signals Processing algorithms in Television Cameras when Transmitting Moving Objects," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board*

Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078631.

[19] A. Y. Kudryashova, A. S. Adzhemov and I. V. Vlasuyk, "Application of Weber-Fechner Law in Image Transmission in the Field of Onboard Communications," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SOSG.2019.8706774.

[20] D. Egorov, A. Egorova and A. Potashnikov, "Efficiency Evaluation of Noise Based Camera Measurements Algorithms," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi:

10.1109/IEEECONF56737.2023.10092086.

[21] V. V. Ivanchev, I. V. Vlasuyk, E. P. Stroganova, "Objective assessment of colours' warmth," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 1, pp. 44-50. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-44-50.

[22] A. M. Potashnikov, I. V. Vlasuyk, "Method of equal contrast color space construction for a given information visualization system and control conditions," *T-Comm*, 2020. Vol. 14, no.4, pp. 15-22.

[23] Bogachkov I.V. 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.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА

Егоров Дмитрий Аркадьевич, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, d.a.egorov@mtuci.ru

Балобанов Андрей Владимирович, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, andrey_sam@mail.ru

Строганова Елена Петровна, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Аннотация

Важным этапом при выборе камер видеонаблюдения является оценка оптической разрешающей способности формируемого изображения, поскольку этот параметр является наиболее важным в наборе, определяющем способность внешних или вспомогательных систем обнаруживать и распознавать объекты и события в видеопотоке. Знание частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) камеры необходимо для построения надежных систем замкнутого телевидения (ССТV) для обнаружения и идентификации угроз. Могут использоваться различные подходы к извлечению формы ЧКХ, но некоторые специфические свойства камер, используемых в этой области (такие как отсутствие доступа к необработанным изображениям, невозможность полного отключения встроенной обработки изображений), делают традиционные методы менее применимыми в автономном режиме, поэтому для достоверной оценки характеристик образцов камер требуется комбинированный подход. В этой статье мы описываем процедуру и средства автоматизации, которые могут ускорить процессы измерений, а также сделать их более повторяемыми. Представленные результаты также освещают возможные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: передаточная функция модуляции, ССТV, камера безопасности, качество изображения.

Литература

1. Egorov D. A., Fedorov V. D., Vlasuyk I. V., Potashnikov A. M., Mozhaeva A. I. A Novel Method for Estimating the Spatial Frequency Characteristics of Cameras Based on Generative Random Sequences // *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744396.

2. Burns P. D., Williams D. Camera Resolution and Distortion: Advanced Edge Fitting, Proc // *IS&T International Sym. on Electronic Imaging, Image Quality and System Performance XV*, IQSP-171, 2018.

3. Masaoka K. Accuracy and Precision of Edge-based Modulation Transfer Function Measurement for Sampled Imaging Systems // *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 41079-41086.

4. Власюк И.В. Метод контроля пространственных характеристик телевизионных камер // *Метрология и измерительная техника в связи*. 2005. № 6. С. 13.

5. Sarah Kerr. Recommendations For the Detection and Analysis of the ISO 12233:2023 e-SFR Slanted Star // *Electronic Imaging*, 2024, pp 271-1 - 271-6, <https://doi.org/10.2352/EI.2024.36.9.IQSP-271>

6. Jones R. A. An Automated Technique for Deriving MTFs from Edge Traces, *Photogr // Sci. Eng.*, 1967, no. 11, pp. 102-106.
7. Sasaki Shizuki, Masaoka Kenichiro, Koike Yasuhiro. 38-3: Design of Random Depolarization Films Based on Modulation Transfer Function Measurements // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2023. No. 54, pp. 547-550. 10.1002/sdtp.16615.
8. Williams D., Burns P. D. Low-frequency mtf estimation for digital imaging devices using slanted edge analysis // *SPIE-IS&T EI Symp.* 5294, pp. 93-101, 2004.
9. ISO 12233:2024, *Photography-Electronic Still Picture Imaging- Resolution and Spatial Frequency Responses*. ISO, 2024.
10. Ponomarenko K., Egorov D., Kudryashov V., Egorova A., Vlasuyk I. Impact of Camera Characteristics and Settings on Precession of AI Object Recognition Models // *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496772.
11. Lee D. u др. Precision and characteristics of satellite spatial quality estimators' measurement using an edge target imaged with KOMPSAT-3A // *Remote Sens.*, vol. 16, no. 24, p. 4660, 2024. DOI: 10.3390/rs16244660.
12. Muller P., Braun A. MTF as a performance indicator for AI algorithms? // *J. Electron. Imaging*, vol. 35, no. 16, pp. 125-121, 2023. DOI: 10.2352/EI.2023.35.16.AVM-125
13. Masaoka Kenichiro. Enhancing Accuracy and Precision in Omni-Angle Edge-Based Modulation Transfer Function Measurements // *IEEE Access*, 2025, pp. 1-1. 10.1109/ACCESS.2025.3532119.
14. Amilia Riska, Anam Choirul, Mahdi Karrar, Naufal Ariij, Dougherty Geoff. Evaluation of the edge profile shifting based on statistical approach to improve the edge-based mtf measurement // *Jurnal Teknologi*. 2024.
15. Fan Yuan-Peng, Wei Lei, Wang Yu-Hao, Hu Zi-Qiang, Li Lin. Improved method for modulation transfer function measurement of Bayer color cameras // *Applied Optics*. 2023. 62. 10.1364/AO.504655.
16. Park Daesoon, Yoo Daehoon. Precision and Characteristics of Satellite Spatial Quality Estimators' Measurement Using an Edge Target Imaged with KOMPSAT-3A // *Remote Sensing*. 2024. 16. 4660. 10.3390/rs16244660.
17. Anastasia Mozhaeva, Michael J. Cree, Robert J. Durrant, Igor Vlasuyk, Aleksei Potashnikov, Vladimir Mazin, Lee Streeter. A contrast sensitivity model of the human visual system in modern conditions for presenting video content // *PLOS ONE*. 2024, no. 19(5): e0303987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303987>
18. Vlasuyk I. V., Potashnikov A. M., Balabanov A. V. Fedorov V. D. Estimation of Efficiency of Video Signals Processing algorithms in Television Cameras when Transmitting Moving Objects // *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078631.
19. Kudryashova A. Y., Adzhemov A. S. Vlasuyk I. V. Application of Weber-Fechner Law in Image Transmission in the Field of Onboard Communications // *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SOSG.2019.8706774.
20. Egorov D., Egorova A., Potashnikov A. Efficiency Evaluation of Noise Based Camera Measurements Algorithms // *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092086.
21. Иванчев В.В., Власюк И.В., Строганова Е.П. Объективная оценка теплохолодности цветов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Том 18. №1. С. 44-50.
22. Поташиников А.М., Власюк И.В. Метод построения равноконтрастного цветового пространства для заданной системы отображения информации и условий контроля // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2020. Том 14. №4. С. 15-22.
23. Богачков И.В. Обнаружение натяженных участков в оптических волокнах на основе метода бриллюэновской рефлектометрии // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2016. Vol. 10. № 12. С. 85-91.

STOCHASTIC TIMETABLE DISTURBANCES IN HEAVY HAUL AND EXTRA-LONG TRAIN TRAFFIC

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-53-60

Valeriy V. Polyanov,
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia,
polyanovvv@mail.ru

Manuscript received 12 January 2025;
Accepted 10 February 2025

Victor V. Atuchin,
Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia;
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,
atuchin@isp.nsc.ru

Sergei A. Bessonenko,
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia,
bessonenko@stu.ru

Keywords: *timetable disturbances, train delays, stochastic disturbances, heavy haul train, extra-long train, train interval, virtual coupling*

This work is aimed at studying the stochastic assessment of the timetable accuracy of heavy haul and extra-long trains in real traffic conditions. The timetable accuracy is dependent on several factors, including climate conditions, rolling stock specification, railway track profile, fails of equipment, speed limitations, etc. These factors affect every train movement on the section at the observation time. However, the timetable accuracy may be drastically reduced depending on specific train features, such as type (passenger or freight), weight and length. There are trains of the weight up to 8000 tons and a length up to 2 km on the Trans-Siberian railway and increasing throughput on railroad sections by reducing train intervals is topical. In this case, stochastic timetable disturbances may significantly limit the value of train interval and section throughput. In the study, a mathematical modeling of train delays on a railroad section based on the statistical data of timetable execution is developed. It is shown that the train disturbances and malfunctions can be considered using a stochastic approach. The way to estimate timetable disturbances by distributions of chi-square, Erlang, Gamma and Weibull is found in this contribution. The research results may be used for the simulation models development and timetable planning, especially for the design of timetable robustness.

Information about authors:

Valeriy V. Polyanov, Railway Transportation Management Faculty, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, ORCID 0009-0002-9813-0585

Victor V. Atuchin, Laboratory of Optical Materials and Structures, Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia; Research and Development Department, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia; Department of Industrial Machinery Design, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, ORCID 0000-0002-7424-5604

Sergei A. Bessonenko, Railway Transportation Management Faculty, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, ORCID 0000-0001-5782-1596

Для цитирования:

Польянов В.В., Атучин В.В., Бессоненко С.А. Стохастические отклонения от графика движения тяжеловесных и длинносоставных поездов // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 53-60.

For citation:

V. V. Polyanov, V. V. Atuchin, S. A. Bessonenko, "Stochastic timetable disturbances in heavy haul and extra-long train traffic," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 53-60.

1 Introduction

The process of planning on the railway transport is aimed at accounting the distribution of freight and passenger trains, local work execution, reducing infrastructure faults, meeting the standard weight and length of trains, etc. The development of optimal routes in freight traffic requires increasing the throughput in railway sections [1]. At the same time, developing a robust timetable is an important task for the railway efficiency increase, especially in the Traffic Management System (TMS) development.

TMSs are advanced systems that help increase the throughput of railways by reducing of train interval to 4 minutes or less instead of 8-10 minutes typical in the case of automatic block systems [2,3]. According to the results reported in [4,5], the telecommunication infrastructure on railway sections is ready for the implementation of virtual coupling on the sections of Trans-Siberian Railway. However, the effectiveness assessment and optimal section selection for testing the technology can be carried out only based on safety and specific conditions, such as traffic characteristic, infrastructure limitations, climate, track numbers, electric traction, rolling stock capacity, human factor, etc. For example, in accordance with the timetable standard [6], the proper running time on a railroad section is dependent on rolling stock conditions, locomotive power, load capacity of catenary, safety requirements of train traffic, dynamic loads, etc.

One of specific conditions of the Trans-Siberian Railway is heavy haul and extra-long train traffic. The efficiency of heavy haul transport can be increased with changing optimal train intervals by a virtual coupling implementation. At present, researches propose programming models, such as the train service plan problem, train timetabling problem model and simulated annealing algorithm [7, 8]. These approaches allow obtaining a train service plan by minimizing the operation cost and maximizing the transportation volume of special heavy haul railway lines. The distance headway scheme for heavy haul trains, sometimes, is not efficient to reach a virtual coupling of freight trains. In [9], the virtual coupling was studied for heavy haul freight trains, and it was proposed to set the follower train to be a certain time behind the schedule of the leader train rather than the distance headway. The disturbances in heavy haul lines may especially occur in virtual coupling sections. In [10], the virtual coupling-based timetable rescheduling method was proposed to reduce the delays under disruptions and increase the line capacity by the mixed-integer linear program (MILP) model.

The Trans-Siberian railway is a passenger-freight collinear railway. The accuracy of timetable execution for freight trains is comparatively low because of high priority of passenger trains. It leads to significant fluctuations in reference to a proper timetable and crew plan in the presence of disturbances. The problem of rescheduling the train timetable and crew scheme in the presence of disruptions on a passenger-freight collinear railway was considered in [11]. The mixed-integer linear program model was developed considering the distinctive priorities of passenger and freight trains, as well as crew operations in order to minimize train delays and fluctuations in the crew schedule, while maximizing the delivery rate of freight trains at the railway. The robust railway design considering freight train traffic fluctuations was implemented in [12]. The optimization model of the robust version of strategic timetable is developed as discrete scenarios. At the same time, the

uncertain freight train demand is modeled using optional trains, which can be inserted in the resulting timetable.

Another reason of freight trains timetable fluctuation is infrastructure limitations. The severe fluctuations in the traction power may depend on the train operation stability. Researches tried to account for operation conditions in mountain railways and reveal the ways for the train timetable optimization of mixed passenger/freight railways to reduce their impact on weak power grids [13, 14]. The electromagnetic compatibility limitations on the railway transport, as emissions from power lines to nearby lines and signal circuits, were reported in [15, 16].

In accordance with the train interval calculation methodology [17], the motion on the railroad section is described as a stationary process. It does not consider any stochastic fluctuations from the proper timetable. However, there are train delays occurred in real traffic conditions, which may lead to a change of train interval, running time on the section and the throughput. Timetable disturbances caused by a wide range of factors related to the functioning of railway units or induced by external factors are difficult to take into account. Train delays caused by the direct influence of an interfering factor are called primary delays, and secondary delays appear due to the delays of earlier trains [18]. Nowadays, topical is to increase robustness at the timetable level for heavy haul and extra-long train traffic, especially in TMS conditions. It allows increasing the throughput of railways by setting an optimal train interval. That is why the main purpose of the work is to reveal and estimate the timetable disturbances on a railroad section planned to be implemented by the virtual coupling technology.

One of the approaches used by researchers to consider the timetable disturbances is stochastic modeling. It presents the data on complex processes and predicts the outcomes that account for certain levels of unpredictability or randomness, especially in combination with stochastic interference. Stochastic microscopic simulation models allow recognizing the capacity and stability of timetable depending on the TMS type (such as radio-based control systems) implemented on the railroad section. The evaluation by this algorithm is based on simulation experiments [19]. The results of modeling allow changing priority lines for a possible installation of advanced train interval systems based on the capacity and operational conditions. The model of primary train delays allows creating a robust timetable by discrete probability distributions. In [20], the exact symbolic simulation method is used to compute the impact of delays in railway systems. To reach that, the method of computing exact probabilistic quantities was proposed. The delay probability distributions, expected delays for timetable trains or expected capacity use of infrastructure elements may be estimated by stochastic algorithms. These approaches allow recognizing infrastructural problems and increasing the timetable robustness. In [21], a two-step stochastic optimization model was used to allocate the supplements and buffers with the objective of minimizing the real-time schedule fluctuation from the planned timetable. This approach is one of the easiest to realize and implement the calculations, but it is not precise when a complex environment is considered.

In order to estimate the efficiency of TMS implemented on the Trans-Siberian railway, it is necessary to introduce stochastic disturbances in the simulation model. Accordingly, the present study is aimed at describing timetable disturbances for a train flow on a selected railroad section by the optimal mathematical function. Furthermore, as the timetable execution accuracy may be

dependent on train conditions (weight, length, kind of haulage etc), the created stochastic model should be able to account the freight train traffic for different train categories, especially for heavy haul and extra-long trains. The implementation of stochastic approach for analyzing timetable may describe the disturbances observed across the Trans-Siberian railway and establish the reasons of delays. The timetable disturbances are estimated as fluctuations from a proper running time on the railroad section Oy-Mos of the Trans-Siberian Railway. The position of the railroad section Oy-Mos on the topographic map is shown in Figure 1.

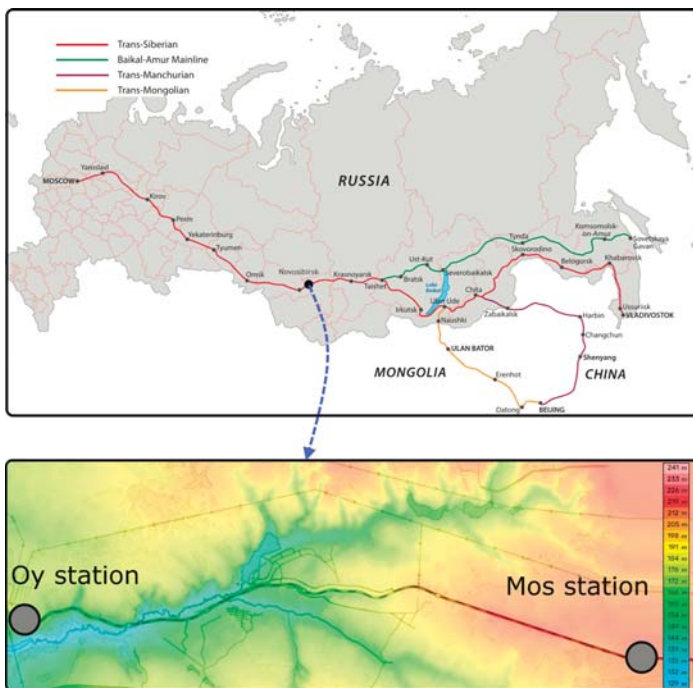


Fig. 1. Scheme of railroad section Oy-Mos

The Oy-Mos railroad section is a passenger-freight collinear railroad part with heavy haul and extra-long train traffic. Special conditions of the section include curves and long hilly parts inclined up to 10.8%. Average percent of trains delayed more than 1 minute on this railroad section is 98% per month.

The study is based on the timetable execution data collected from automated train motion monitoring system during 240 h. The train departure and arrival data were recorded using automatic block signaling and interlocking devices (on the occupation of block section circuits). The train category is identified by the number which is assigned for the transportation route. It allows recognizing the train category in statistical data including heavy haul and extra long trains. The reliability of the data is ensured by synchronization automatic block system devices with the NTP server. In accordance with the methodology for processing train timetable statistics [22], the timetable execution data are recorded with an accuracy of ± 1 min.

2 Methods

The process of the train motion along a railway section may be described using the following differential equations [23]:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = a \end{cases}, \quad (1)$$

where s is the railway section distance of the train relative to the railway station, v is the train speed and a is the train acceleration. But the problem of this approach is in recognizing the fluctuations of kinematic parameters of a moving train in real traffic. As transportation is the process of transfer trains between stations, it is possible to consider disturbances from the timetable execution data.

The study includes an analysis of the data on real train traffic using probabilistic statistical methods. A hypothesis was put forward about the possibility of describing a statistical sample using the known distribution laws. The statistical hypothesis was tested on the compliance of the assumed distribution law with the theoretical law at a significance level of 0.05 using the Chi-square criterion.

A mathematical model of train flows via a railway station was proposed in [24]. The mathematical model is based on the collected statistical data on the Trans-Siberian railway. The timetable fluctuations of freight trains are considered on the stochastic approach. The obtained modeling results show the distribution laws of train delay values for passenger and freight trains. However, such specific track and traffic conditions as heavy haul and extra-long trains were not considered in [24].

3 Timetable execution accuracy on the railroad section

The statistical data of timetable execution were collected during 10 days of January. The running time on the railroad section is analyzed in accordance with the following conditions:

- running time fluctuations of up to 0.1 min are discarded;
- running time fluctuations more than 0.1 min up to 1 min are accepted as 1 min in accordance with the Train Timetable Guide [25] and Regulation for the Timetable Data Analysis [22];
- train delays in the railroad section more than 1 h for freight trains and more than 6 min for passenger trains are not considered as a stochastic delay. It is topical because such timetable fluctuations are caused by the failure of technical facilities in accordance with the terms of the regulation for the failures analysis in the railway infrastructure [26].

The length of railroad section Oy-Mos is 23.1 km. The proper running time on the observed section is 21 min for freight trains and 17 min for passenger and suburban ones. Negative values (ahead of timetable) are not taken into account. The results of the statistical data of timetable execution are shown in Table 1.

Table 1

Running time fluctuations on the railroad section Oy-Mos by train categories

	Total	Heavy haul trains	Extra long freight trains	Regular freight trains	Passengers and suburban trains	Other trains
Number of trains	1013	238	190	245	220	120
Running time fluctuations	896	233	189	238	40	96
Percent of timetable accuracy	12%	2%	1%	3%	82%	20%

Evidently, there are large timetable fluctuations on the railroad section. The lowest running time accuracy occurs for freight trains, including heavy haul and extra-long freight trains (1-3%). In Figure 2 is the time distribution of timetable fluctuations from the proper running time on the railroad section.

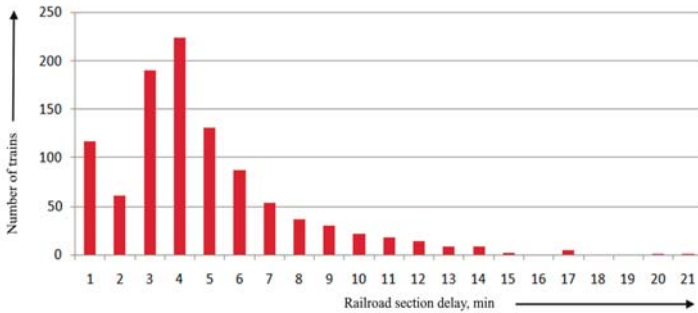


Fig. 2. Distribution of timetable delays on the railroad section

A lot of factors should be taken into account to find and the key causes of the timetable disturbances. For example, a special condition of the Oy-Mos railroad section is the presence of long hilly and curvy sections. Heavy haul trains (up to 7000 tons) on such sections lose their speed at a hilly rise. It may lead to reduction of a train interval and a switching of an automatic block signal to yellow or red one. Moreover, a sizable portion of the disturbances is related to occidental external factors, including weather conditions, visibility conditions, third party influence etc. The values of timetable delays on the railroad section are shown in Table 2.

Table 2

Values of running time fluctuations on the railroad section Oy-Mos

	Total	Heavy haul trains	Extra long freight trains	Regular freight trains	Passengers and suburban trains	Other trains
Total trains	1013	238	190	245	220	120
Fluctuations (min)	3804	1010	786	1005	141	462
Average fluctuation per train (min)	3.8	4.2	4.1	4.1	0.6	3.9

The largest fluctuations belong to freight trains (4.1-4.2 min), including heavy haul and extra-long ones, and the smallest fluctuations belong to passenger and suburban trains (0.6 min). There are neither technical failures nor speed limitations that occurred on the section during the data collection. Thus, the reasons for the observed delays are stochastic disturbances which have to be described in timetable modeling tasks. The train running time depends on many factors, and they are all difficult to taken into account. For this reason, the running time on the railroad section is considered as a random variable, and, in the present study, this variable is described by the stochastic approach.

According to the statistical data, the timetable disturbances analysis is performed by train categories separately. Special attention is paid to heavy haul and extra-long freight trains. The data of timetable fluctuations on the railroad section correspond to the Chi-square, Erlang, Gamma and Weibull distribution laws. The statistical hypothesis verification about the distribution law is carried out at the significance level of 0.05 using the Chi-square criterion. The significance level of 0.05 means that there is a 5% probability of incorrectly rejecting the null hypothesis when it is true [27]. This level strikes a balance between minimizing false positives and detecting real effects.

3.1 Heavy haul train delay distribution

In order to analyze the timetable disturbances for heavy haul trains, the data are distributed over the range from 0 to 20 min by intervals of 1 min. It includes 238 heavy haul train observations out of the available 1013 of the total trains number. The horizontal axis shows the time of delay in minutes and the vertical axis shows the number of trains. Chi-square, Weibull, Erlang and Gamma functions are used for fitting to reveal the optimal distribution law of the general population. The train delays histogram and its approximation by selected functions are presented in Figure 3.

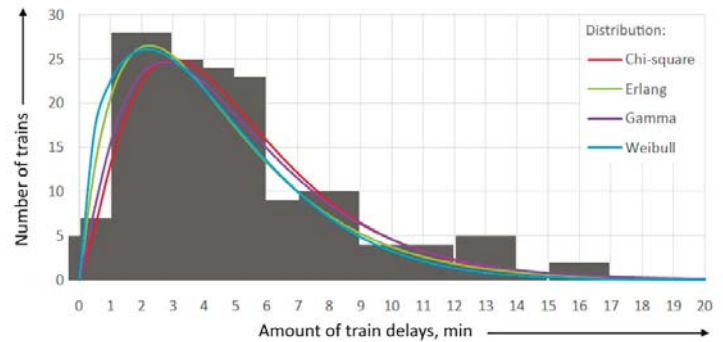


Fig. 3. Statistical distribution of heavy haul train delays

In Figure 4 are the cumulative distribution functions according to Chi-square, Weibull, Erlang and Gamma distributions.

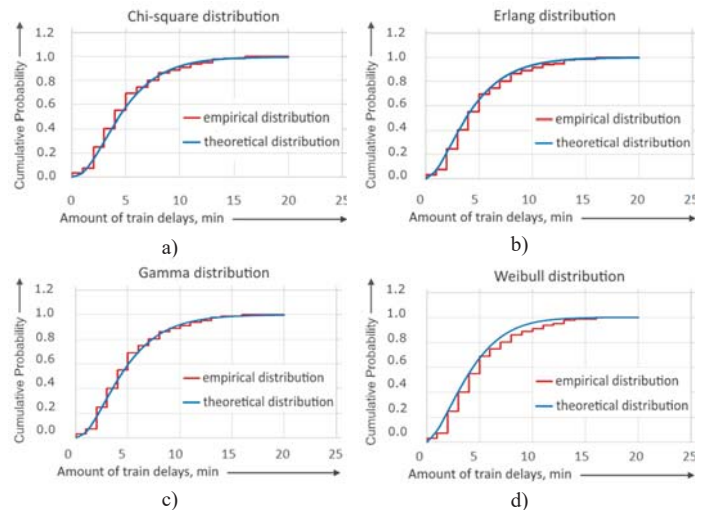


Fig. 4. Approximations of heavy haul train delay cumulative distribution functions by: a) Chi-square; b) Erlang; c) Gamma; d) Weibull distributions

The hypotheses test is performed using the chi-square criterion. The sample shows that the delay values from 13 to 20 min should be combined into one interval. That is why this interval is extended to a large value. The calculated results of theoretical distributions are given in Table 3.

Table 3

Calculation results of the delay distribution for heavy haul trains

Time interval [a,b)	Number of delays by				
	Observation data	Chi-square distribution	Erlang distribution	Gamma distribution	Weibull distribution
0 1	5	6.06434	12.0295	7.9855	16.0307
1 2	7	18.3742	24.3386	20.0869	24.8379
2 3	28	24.1638	26.235	24.296	25.7615
3 4	25	24.3923	23.6175	23.5539	23.3833
4 5	24	21.6328	19.4882	20.5039	19.5815
5 6	23	17.7651	15.2735	16.7452	15.4631
6 7	9	13.8637	11.5692	13.1093	11.651
7 8	9	10.4336	8.55356	9.95882	8.43737
8 9	10	7.64178	6.21041	7.39717	5.90165
9 10	4	5.48028	4.44618	5.39933	4.00149
10 11	4	3.86455	3.14759	3.88647	2.63717
11 12	4	2.68794	2.20791	2.7658	1.693
12 13	2	1.84826	1.53698	1.94968	1.06057
13 20	8	3.78736	3.34578	4.36195	1.55962

The results of distribution assessment indicate that the general population is well approximated by the Chi-square function. The Chi-squared distribution is a continuous distribution determined by equation [28]:

$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\frac{\nu}{2})} \exp\left(-\frac{(x-m)}{2}\right) (x-m)^{\frac{\nu}{2}-1}, \quad (2)$$

where m is the minimum x -value and ν is the shape parameter.

The parameter ν is a number of degrees of freedom which are equal to the mathematical value expectation.

According to the Chi-square criterion at significance level of 0.05, there is no reason to reject the hypothesis since $X^2_{observed} < X^2_{critical}$ ($X^2_{observed} = 18.03$, $X^2_{critical} = 21.03$). Thus, the distribution of stochastic timetable disturbances of heavy haul trains is well described by the chi-square law.

3.2 Extra-long train delay distribution

The timetable disturbances for the data of extra-long trains are constructed in the range from 0 to 20 min by intervals of 1 min. In Figure 5 is the histogram of train delays and distribution functions. The statistical data includes 190 extra-long train observations out of the available 1013 of the total trains number (19%).

The horizontal axis shows the time of delay in minutes, and the vertical axis shows the number of trains. Chi-square, Weibull, Erlang and Gamma functions are employed for fitting to put forward a hypothesis about the distribution law of the general population.

The hypotheses test is performed using the chi-square criterion. The sample shows that the delay values from 13 to 20 min should be combined into one interval. That is why this interval is extended to a large value. The results of theoretical distributions are given in Table 4.

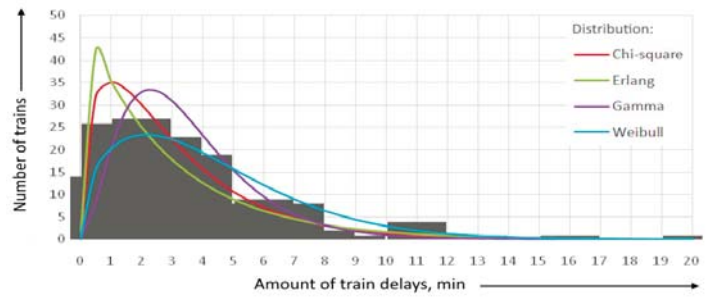


Fig. 5. Distribution of extra-long train delays

In Figure 6 are the empirical distribution and theoretical distributions according to Chi-square, Weibull, Erlang and Gamma functions.

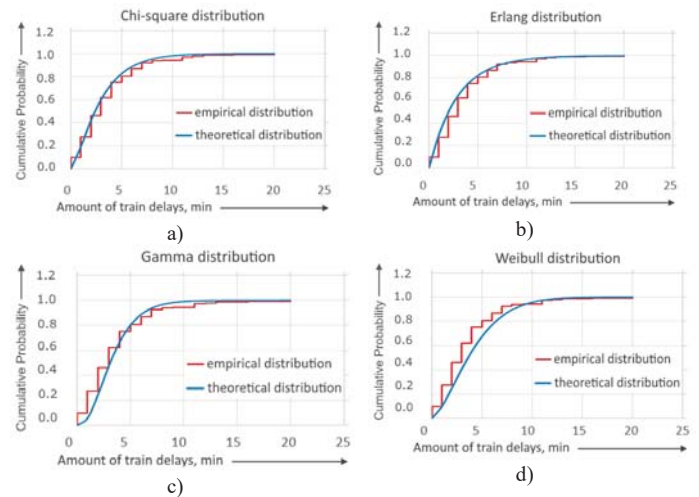


Fig. 6. Approximations of the extra-long train delay cumulative distribution functions by: a) Chi-square; b) Erlang; c) Gamma; Weibull distributions

Table 4

Calculation results of the delay distribution for heavy haul trains

Time interval [a,b)	Number of delays by				
	Observation data	Chi-square distribution	Erlang distribution	Gamma distribution	Weibull distribution
0 1	14	28.8185	42.2974	8.78858	14.3485
1 2	26	33.1826	29.959	28.1361	22.2315
2 3	27	26.2133	21.2198	32.7682	23.0582
3 4	23	18.8734	15.0298	27.2639	20.9295
4 5	19	13.0017	10.6455	19.2306	17.5266
5 6	8	8.7271	7.54016	12.2966	13.8405
6 7	9	5.75831	5.34065	7.36796	10.4284
7 8	8	3.75348	3.78275	4.21532	7.55196
8 9	2	2.42452	2.67929	2.3297	5.28234
9 10	1	1.55509	1.89773	1.25349	3.58158
10 11	0	0.99184	1.34415	0.66014	2.36043
11 12	4	0.62969	0.95205	0.34163	1.51534
12 13	1	0.39825	0.67433	0.17424	0.94927
13 20	3	0.67231	1.63735	0.17368	1.39595

The results of distribution assessment allow putting forward a hypothesis about the Weibull distribution of the general population. The Weibull distribution is a continuous distribution determined by equation [28]:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} ((x - m)/\beta)^{\alpha-1} \exp(-((x - m)/\beta)^\alpha), \quad (3)$$

where m is the minimum x -value, α is the shape parameter > 0 and β is the scale parameter > 0 . The distribution parameters λ and β are determined from the following equations:

$$\begin{cases} EX = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ DX = \lambda^2 \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2\right) \end{cases} \quad (4)$$

where EX is the mathematical expectation of stochastic disturbances, DX is the dispersion and Γ is the Gamma-function.

According to the chi-square criterion at a significance level of 0.05, there is no reason to reject the hypothesis since $X^2_{\text{observed}} < X^2_{\text{critical}}$ ($X^2_{\text{observed}} = 16,52$, $X^2_{\text{critical}} = 19,68$). As obtained, the extra-long train traffic is characterized by Weibull distribution of stochastic timetable disturbances unlike the heavy haul one. Thus, considering disturbances by a train category may increase the accuracy of train delay simulation models.

4 Discussions

The results of statistical data analysis show that the lowest running time accuracy occurs for freight trains, including heavy haul and extra-long freight trains (1-3%). However, in [24], the opposite results were provided for the delay analysis in the Ural region of the Trans-Siberian railway. In this case, 41.4% of freight trains were observed on the proper timetable. Such results are due to some approach differences. In the statistical data of the Ural region of the Trans-Siberian railway, the freight train was considered as delayed if its departure was on the timetable or up to 5 min later. This is because the absolute train delay (from the moment of train formation) was considered. However, the most important for the TMS implementation is not the absolute value of delay, but the delay observed just on the railroad section. It allows taking into account primary and secondary delays caused by stochastic disturbances.

In the present study, the distribution laws of train delays were determined based on the results of theoretical distribution laws using the chi-square criterion at the significance level of 0.05. The distribution of timetable disturbances for heavy haul trains on the Oy-Mos section obeys the chi-square law. The distribution of timetable disturbances for extra-long trains on the Oy-Mos section obeys the Weibull law. However, in [24], the Gamma distribution was stated as the best for freight train delays. That is why the distribution law should be proved for each railroad section model.

The average delay value per train on the railroad section Oy – Mos is 4.2 min for heavy haul trains (21% delay from the proper railroad section timetable), 4.1 min for extra-long trains (20.5% delay) and 0.6 min for passenger trains (3.5% delay). Such delays are commensurate to the values of minimal virtual train coupling interval (3-5 min). This condition significantly complicates the task of throughput increase by reducing the train interval. The analysis of the real traffic train interval under the condition of simultaneously operating both the virtual coupling and automatic block system was carried out in [3]. The average train speed was 56 km/h, and the train interval was 9-12 min. The obtained results show the low efficiency of the virtual coupling technology for the throughput increase.

The analysis of real timetable data in the Swedish Railways was carried out in [18]. This allowed using empirical data as input ones for the simulation model. The data were divided on the train type, namely, local, regional and long-distance passenger trains,

as well as freight trains. In total, 99.4% of the deviations in running and dwell times were in the range of ± 10 min, 92.7% in the range of ± 3 min and full 75% in the range of ± 1 min. The accuracy of the schedule between Helsingborg and Karlskrona on the Swedish Railways is higher than on the Oy-Mos section. However, the data cannot be objectively compared due to the different type of traffic. It is also necessary to take into account the infrastructure conditions, such as electrification, length of the section, presence of hilly and curvy sections etc. Despite this, the stochastic analysis in both researches creates conditions for further analysis of primary and secondary delays.

The human factor also cannot be excluded in affecting the timetable accuracy, especially under difficult conditions of hilly sections and heavy haul trains. In Figure 6 (a) is the scheme of heavy haul train movement to the rise.

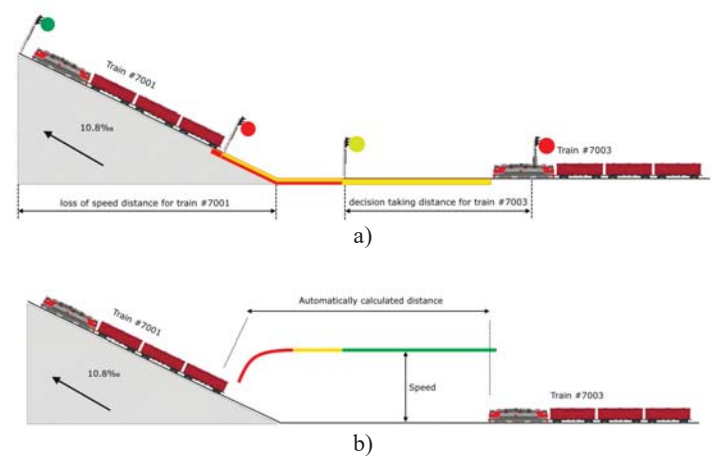


Fig. 7. Train movement on the hilly section: a) on an automatic block system section and b) on virtual coupling section

The heavy haul train has to move at a speed of at least 50 km/h in the foot part of the rise. The movement at a speed less than 50 km/h creates a risk of stopping at the rise. In this case, the train cannot overcome the rise without assisting by a supporting locomotive. If the train driver sees a yellow signal, he is driving in a state of uncertainty. It is necessary to make a decision about an appropriate speed value in the absence of speed data of the train going ahead. In many cases, a rational decision is to reduce the speed on a flat section and save the distance. It allows accelerating up to the required speed (50 km/h) when the green signal comes on. Such decisions lead to an increase of disturbances due to the human factor. The TMS and virtual coupling allow increasing the timetable accuracy, as shown in Figure 6 b). In the case of virtual coupling, the distance and speed of train #7003 are automatically calculated based on the kinematic data of train #7001. It may increase the timetable accuracy by reducing the influence of human factor.

To increase the traffic robustness, researchers add a buffer time and minimum headway interval to their calculations to reduce or prevent the propagation of delays when a train is late. In [29], they modeled each buffer time as an object whose value is determined according to commercial and operational criteria, and whose size is calculated based on a disturbances value. The stochastic analysis of the train timetable by train categories on the Oy-Mos railroad section allowed arranging trains into a timetable package by the deviations magnitude (e.g. train category). The separation of such packages by buffer times may increase the reliability and stability of the schedule.

5 Conclusions

A common timetabling problem is description and evaluation of disturbances. This study presented an analysis of stochastic disturbances from the train timetable on the railroad section Oy – Mos of the Trans-Siberian Railway. The approach for describing the disturbances distribution may be used for delays estimation on any section for the TMS implementation. In general, freight trains are characterized by a low percentage of timetable accuracy. It is evident from the analysis and may be associated with train characteristics (weight, length) and track conditions (hilly and curvy sections). The timetable disturbance value varies from 0 to 20 min per train on the railroad section. Since the problem of reducing the train interval may occur, for example, when virtual coupling or another TMS will be implemented on the railroad section. However, reducing the planned train interval may lead to an increase of secondary delays. The first way of further work is the analysis of stochastic disturbances for other railroad sections with different conditions, including climate, traffic intensity, passenger to freight trains ratio, etc. The mathematical modeling of stochastic disturbances allows increasing the reliability of the timetable at the planning stage, for example, by the calculation of optimal minimal train interval or including a buffer time in the timetable.

The distribution law of stochastic disturbances may be introduced in simulation models to solve practical problems depending on the infrastructure and other specific conditions. That is why the second way of further work is developing the robust timetable on railroad sections of heavy haul train traffic. The research results of delays distribution for train categories will be useful for the simulation. It also allows implementing the obtained results in a real train timetable.

References

- [1] O. Yugrina, L. Zharikova, A. Bessolitsyn et al., "Specific Features of the Railway Polygon Operation with Empty Car Traffic," *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia*. 2021. Vol. 2. Novosibirsk: Springer Nature, 2022, pp. 376-384. DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_42.
- [2] Lu Fang, Wang Liyu, Hu Jiangfeng, Zhang Qi, Li Xiaojuan, "Integrated Optimization of Train Diagrams and Rolling Stock Circulation with Full-Length and Short-Turn Routes of Virtual Coupling Trains in Urban Rail Transit," *Applied Sciences*. 2024. No.14. 5006. 10.3390/app14125006.
- [3] S. Bushuev, I. Kovalev, "Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling," *Automation in transport*. 2024. No.1, pp. 64-73. DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73.
- [4] A. Dolgiy, A. Sakharov et al., "The virtual coupling" at the eastern testing ground: achieved effects and development directions," *Transport of the Russian Federation*. 2023. No. 5-6 (108-109), pp. 15-19.
- [5] S. Filippov, V. Polyanov, "Organization of access to videoconferencing via cellular networks," *Automation, Communications, Informatics*. 2014. No. 6, pp. 31-33.
- [6] Train schedule standards. Standards for providing trains with brakes and permissible train speeds. Data on tare weight and nominal length of rolling stock and special rolling stock (approved by Order of JSC Russian Railways dated 31.12.2015 N 3218r)
- [7] Chen Weiya, Zhuo Qinyu, Zhang Lu, "Modeling and Heuristically Solving Group Train Operation Scheduling for Heavy-Haul Railway Transportation," *Mathematics*. 2023. 11.2489. 10.3390/math11112489.
- [8] Zhuo Qinyu, Chen Weiya, Yuan Ziyue, "Optimizing Mixed Group Train Operation for Heavy-Haul Railway Transportation: A Case Study in China," *Mathematics*. 2023. 11.4712. 10.3390/math11234712.
- [9] Wu Qing, Ge Xiaohua, Zhu Shengyang, Cole Colin, Spiriyagin Maksym, "A Time Headway Control Scheme for Virtually Coupled Heavy Haul Freight Trains," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2024. 146. 1-16. 10.1115/1.4065401.
- [10] Ma Xiaolan, Zhou Min, Wang Hongwei, Song Weichen, Dong Hairong, "Virtual-Coupling-Based Timetable Rescheduling for Heavy-Haul Railways Under Disruptions," *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2024, pp. 1-10. 10.1109/TCSS.2024.3404550.
- [11] Wang Rui, Zhou Min, Wang Hongwei, Yang Bo, Dong Hairong, Wang Fei-Yue, "Coordinated Rescheduling of Train Timetable and Crew Scheme for Passenger-Freight Collinear Railway," *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2024 pp. 1-11. 10.1109/TCSS.2024.3379214.
- [12] Sander Tim, Friesen Nadine, Nachtigall Karl, Nießen Nils, "Robust Railway Network Design based on Strategic Timetables," 2023. 10.48550/arXiv.2308.00483.
- [13] Li Mi, Dai Chaohua, Chen Weirong, "Train Timetable Optimization for Suppressing Traction Power Fluctuations, Especially on Mountainous Railway Lines with Long, Steep Grades," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2024. 2678. 10.1177/03611981231220631.
- [14] Chen Chunjun, Guan Junping, "Study on longitudinal dynamics of 5000t heavy haul train on mountain railway," *Advances in Computer and Engineering Technology Research*. 2023. 1. 197. 10.61935/acetr.1.1.2023.P197.
- [15] Wang Chen, Liang Xiaodong, Adajar Emerson, "A Systematic Approach for AC Electromagnetic Interference Study Between Railways and Nearby Power Lines," *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023. 59. 10.1109/TIA.2023.3290572.
- [16] V. Polyanov, "Electromagnetic compatibility standardization," *Automation, Communications, Informatics*. 2016. No. 7, pp. 18-21.
- [17] Instructions for determining station and train intervals taking into account new means and methods of interval regulation of train traffic (approved by Order of JSC Russian Railways N 721 dated 09.12.2016).
- [18] Palmqvist Carl-William, Johansson Ingrid, Sipilä Hans, "A method to separate primary and secondary train delays in past and future timetables using macroscopic simulation," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2023. 17. 100747. 10.1016/j.trip.2022.100747.
- [19] Bažant Michael, Bulíček Josef, "Impact Assessment of Interlocking Systems on Single-Track Railway Lines as a Measure Leading to Resilient Railway System," *Journal of Advanced Transportation*. 2022. pp.1-18. 10.1155/2022/7025130.
- [20] Haehn Rebecca, Abraham Erika, Nießen Nils, "Symbolic Simulation of Railway Timetables Under Consideration of Stochastic Dependencies," 2021. 10.1007/978-3-030-85172-9_14.
- [21] L. Meng, M. Muneeb, X. Jiang, A. Khattak, M. Khan, "Increasing Robustness by Reallocating the Margins in the Timetable," *Journal of Advanced Transportation*. 2019. No. 2019(1), pp. 1-15. DOI:10.1155/2019/1382394.
- [22] Methodological provisions for automated analysis of the railway timetable (approved by the Order of JSC Russian Railways dated 9.03.2010 N 454r).
- [23] Li Gaosong, Zou Jinbai, Ma Weijie, Lan Meng, "Research on virtual coupling technology in rail transit train collision protection," *Transportation Safety and Environment*. 2023. 6. 10.1093/tse/tdad012.
- [24] M. Zharkov, P. Parsyurova, A. Kazakov, "Modeling the operation of stations and sections of the railway network based on the study of deviations from the schedule," *Bulletin of IrSTU*. 2014. No. 6 (89).
- [25] Instructions for developing train schedules at JSC Russian Railways (approved by Order of JSC Russian Railways N 3362r dated 12.28.2023).
- [26] On approval of the Regulation on the recording, investigation and analysis of cases of failures in the operation of technical equipment on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated system KAS ANT" (approved by Order of JSC Russian Railways dated 23.12.2013 N 2852r).
- [27] E. S. Ventzel, L. A. Ovcharov, "Probability theory and its engineering applications," Textbook for technical colleges. 2nd edition. Moscow: High school, 2020. 480 p.
- [28] J. L. Devore, K. N. Berk, M. A. Carlton, "The analysis of variance," In *Modern Mathematical Statistics with Applications*. STS, Springer, Cham. 2021.
- [29] B. Duvnjak, T. Josip, D. Kezic, "Buffer Time Optimization in the Function of Timetable Stability," *Traffic & Transportation*. 2023. No. 35(4), pp. 514-524. DOI:10.7307/ptt.v35i4.13.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ И ДЛИННОСОСТАВНЫХ ПОЕЗДОВ

Польянов Валерий Валерьевич, Сибирский Государственный Университет Путей Сообщения, Новосибирск, Россия, olyanovv@mail.ru
Атучин Виктор Валерьевич, Институт физики полупроводников, СО РАН, Новосибирск, Россия;
 Кемеровский Государственный Университет, Кемерово, Россия;
 Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия, atuchin@isp.nsc.ru
Бессоненко Сергей Анатольевич, Сибирский Государственный Университет Путей Сообщения, Новосибирск, Россия, bessonenko@stu.ru

Аннотация

Работа направлена на стохастическое исследование точности выполнения графика движения тяжеловесных и длинносоставных поездов в реальных условиях движения. Точность выполнения графика зависит от ряда факторов, включая климатические условия, характеристики подвижного состава, профиль железнодорожного пути, отказы оборудования, ограничения скорости и т. д. Эти факторы влияют на движение каждого поезда на участке. Однако точность выполнения графика движения может существенно изменяться в зависимости от конкретных характеристик поезда, таких как категория (пассажирский или грузовой), вес и длина. На Транссибирской магистрали курсируют поезда весом до 8000 тонн и длиной до 2 км. При этом актуально повышение пропускной способности участков железной дороги за счет сокращения интервалов движения поездов. Стохастические нарушения расписания могут существенно ограничить значение интервала движения поездов и пропускной способности участка. В исследовании проведено математическое моделирование задержек поездов на участке железной дороги на основе статистических данных графика исполненного движения. Показано, что отклонения от графика и задержки поездов можно описывать с использованием стохастического подхода. В работе применен способ оценки отклонений от графика с помощью распределений Хи-квадрат, Эрланга, Гамма и Вейбулла. Результаты исследования могут быть использованы при разработке имитационных моделей и планировании отказоустойчивых графиков движения.

Ключевые слова: отклонения от графика движения, задержки поездов, стохастические отклонения, тяжеловесные поезда, длинносоставные поезда, межпоездной интервал, виртуальная сцепка.

Литература

1. Yugrina O., Zharikova L., Bessolitsyn A. et al. Specific Features of the Railway Polygon Operation with Empty Car Traffic // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. 2021. Vol. 2, Новосибирск, 11-14 мая 2021 года. Springer Nature, 2022, pp. 376-384. DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_42. EDN VTEFHT
2. Lu Fang, Wang Liyu, Hu Jiangfeng, Zhang Qi, Li Xiaojuan. Integrated Optimization of Train Diagrams and Rolling Stock Circulation with Full-Length and Short-Turn Routes of Virtual Coupling Trains in Urban Rail Transit // Applied Sciences. 2024. #14. 5006. 10.3390/app14125006
3. Бушуев С.В., Ковалев И.А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 1. С. 64-73. DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73. EDN RXIRJC
4. Долгий А.И., Сахаров А.Г., Дежков М.А. и др. "Виртуальная сцепка" на Восточном полигоне: достигнутые эффекты и направления развития // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 5-6(108-109). С. 15-19. EDN SMARKE
5. Филиппов С.В., Польянов В.В. Организация доступа к видеоконференцсвязи по сетям сотовой связи // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 6. С. 31-33. EDN SGBFYF
6. Нормативы графика движения поездов. Нормы обеспечения поездов тормозами и допускаемые скорости движения поездов. Данные по весу тары и условной длине подвижного состава и специального подвижного состава (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 31.12.2015 N 3218р).
7. Chen Weiya, Zhuo Qinyu, Zhang Lu. Modeling and Heuristically Solving Group Train Operation Scheduling for Heavy-Haul Railway Transportation // Mathematics. 2023. 11.2489. 10.3390/math11112489
8. Zhuo Qinyu, Chen Weiya, Yuan Ziyue. Optimizing Mixed Group Train Operation for Heavy-Haul Railway Transportation: A Case Study in China // Mathematics. 2023. 11.4712. 10.3390/math11234712
9. Wu Qing, Ge Xiaohua, Zhu Shengyang, Cole Colin, Spiryagin Maksym. A Time Headway Control Scheme for Virtually Coupled Heavy Haul Freight Trains // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. 2024. 146. 1-16. 10.1115/1.4065401
10. Ma Xiaolan, Zhou Min, Wang Hongwei, Song Weichen, Dong Hairong. Virtual-Coupling-Based Timetable Rescheduling for Heavy-Haul Railways Under Disruptions // IEEE Transactions on Computational Social Systems. 2024. pp. 1-10. 10.1109/TCSS.2024.3404550
11. Wang Rui, Zhou Min, Wang Hongwei, Yang Bo, Dong Hairong, Wang Fei-Yue. Coordinated Rescheduling of Train Timetable and Crew Scheme for Passenger-Freight Collinear Railway // IEEE Transactions on Computational Social Systems. 2024. pp. 1-11. 10.1109/TCSS.2024.3379214
12. Sander Tim, Friesen Nadine, Nachtigall Karl, Niessen Nils. Robust Railway Network Design based on Strategic Timetables. 2023. 10.48550/arXiv.2308.00483
13. Li Mi, Dai Chaohua, Chen Weirong. Train Timetable Optimization for Suppressing Traction Power Fluctuations, Especially on Mountainous Railway Lines with Long, Steep Grades // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2024. 2678. 10.1177/03611981231220631
14. Chen Chunjun, Guan Junping. Study on longitudinal dynamics of 5000t heavy haul train on mountain railway // Advances in Computer and Engineering Technology Research. 2023. 1. 197. 10.61935/acetr.1.1.2023.P197
15. Wang Chen, Liang Xiaodong, Adajar Emerson. A Systematic Approach for AC Electromagnetic Interference Study Between Railways and Nearby Power Lines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2023. 59. 10.1109/TIA.2023.3290572
16. Польянов В.В. Стандартизация электромагнитной совместимости // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 7. С. 18-21. EDN WDYZDR
17. Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов с учетом новых средств и методов интервального регулирования движения поездов (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 09.12.2016 N 721р).
18. Palmqvist Carl-William, Johansson Ingrid, Sipila Hans. A method to separate primary and secondary train delays in past and future timetables using macroscopic simulation // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2023. 17. 100747. 10.1016/j.trip.2022.100747
19. Bazant Michael, Bulicek Josef. Impact Assessment of Interlocking Systems on Single-Track Railway Lines as a Measure Leading to Resilient Railway System // Journal of Advanced Transportation. 2022. pp.1-18. 10.1155/2022/7025130
20. Haehn Rebecca, Abraham Erika, Niessen Nils. Symbolic Simulation of Railway Timetables Under Consideration of Stochastic Dependencies. 2021. 10.1007/978-3-030-85172-9_14
21. Meng L., Muneeb M., Jiang X., Khattak A., Khan M. Increasing Robustness by Reallocating the Margins in the Timetable // Journal of Advanced Transportation. 2019. № 2019(1). pp. 1-15. DOI:10.1155/2019/1382394
22. Методические положения по автоматизированному анализу графика движения грузовых поездов (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 09.03.2010 N 454р).
23. Li Gaosong, Zou Jinbai, Ma Weijie, Lan Meng. Research on virtual coupling technology in rail transit train collision protection // Transportation Safety and Environment. 2023. 6. 10.1093/tse/tdad012
24. Жарков М.Л., Парсюрлова П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 6(89). С. 23-31. EDN SGIVVF
25. Инструкция по разработке графика движения поездов в ОАО "РЖД" (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 28.12.2023 N 3362р).
26. Положение по учету, исследованию и проведению анализа случаев отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО "РЖД" с использованием автоматизированной системы КАС АНТ (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 23.12.2013 N 2852р).
27. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для втузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
28. Devore J.L., Berk K.N., Carlton M.A. The analysis of variance. Modern Mathematical Statistics with Applications. STS, Springer, Cham. 2021.
29. Duvnjak B., Josip T., Kezic D. Buffer Time Optimization in the Function of Timetable Stability // Traffic & Transportation. 2023. № 35(4), pp. 514-524. DOI:10.7307/ptt.v35i4.13