

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

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

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", 2023

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

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

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблишер"

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

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

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2023

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; EBSCO; eLibrary.ru (ПИНЦ)
Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);
Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;
Registry of Open Access Repositories (ROAR)

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 программного и оргкомитетов WSEAS), Россия, Мексика

Бугаев Александр Степанович

(академик РАН), 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

Зубарев Юрий Борисович

(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ), 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

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

Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э.
Анализ эффективности различных схем организации неортогонального множественного доступа NOMA 4

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 12

ИНФОРМАТИКА

Юденков А.В., Володченков А.М., Римская Л.П.
Дискретная модель эволюции информации сложной системы вблизи точки фазового перехода 20

Загуменнова М.В.
Модели и алгоритмы поддержки принятия решений по расчету материального ущерба от пожаров на транспортных средствах 26

ТРАНСПОРТ

Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К.
Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков 33

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

СВЯЗЬ

Михаил Феноменов, Лев Гольдштейн
Математические модели построения систем WFM телекоммуникационных операторов 42

Якупов Д.О., Малахов С.В.
Анализ эффективности контроллера OpenFlow в сети с разной нагрузкой 49

НОВОСТИ

Российская неделя высоких технологий 55

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

**Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B.,
Pankratov D.Y., Smirnov A.E.**
Analysis of different NOMA schemes efficiency 4

**Varlamov V.O., Kandaurov N.A.,
Lobova E.O., Lobov E.M.**
Comparison of the quality of optimal filtering of the slope
of the dispersion characteristic by the Stratonovich filter
and the unscented Kalman filter 12

COMPUTER SCIENCE

Yudenkov A.V., Volodchenkov A.M., Rimskaya L.P.
Discrete model of information evolution of a complex system
near a phase transition point 20

Zagumenнова M.V.
Models and algorithms to support decision-making on the
calculation of material damage from fire on vehicles 26

TRANSPORT

Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K.
Possibilities of application of ARIMA models in building
forecast values of car-flows 33

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMMUNICATIONS

Michail Fenomenov, Lev Goldstein
Mathematical Models for Telecommunication
Workforce Management 42

Yakupov D.O., Malakhov S.V.
Analysis of the efficiency of the OpenFlow controller
in a network with different loads 49

T•C o m m

Telecommunications and transport

Volum 17. No. 1-2023

Release date: 30.01.2023

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

Alexander S. Bugaev
Academician of the RAS, 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

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

Yuri B. Zubarev
Doctor of sciences, Corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Russia

www.media-publisher.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА NOMA

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-4-11

Бакулин Михаил Германович,*Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com***Бен Режеб Тауфик Бен Камель,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, benrejebt@yandex.ru***Крейнделин Виталий Борисович,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, vtkrend@gmail.com***Панкратов Денис Юрьевич,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, dpankr@mail.ru***Смирнов Алексей Эдуардович,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, smirnov.al.ed@gmail.com***Manuscript received** 07 November 2022;
Accepted 15 December 2023**Ключевые слова:** системы 6G,
неортогональный множественный доступ,
NOMA, кодовая книга, SCMA, WSMA

Большое количество исследований направлено на системы беспроводной связи шестого поколения 6G (Sixth Generation). Особый интерес представляет будущий стандарт проекта 3GPP, определяющий ключевые технологии, которые будут использованы в новом поколении систем беспроводной связи. Технология неортогонального множественного доступа NOMA (Non-orthogonal multiple access) является одной из фундаментальных для систем 6G. Благодаря технологии NOMA возможно реализовать концепцию "Massive connectivity" для систем 6G, предполагающую обеспечение высокой емкости будущих систем связи и более эффективное, чем в системах 4G и 5G, использование радиочастотного спектра. Существует несколько схем организации множественного доступа NOMA. Наиболее перспективными из них являются SCMA (Sparse Code Multiple Access) – множественный доступ с прореженными последовательностями и WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access). Целью данной статьи является сравнение эффективности схем неортогонального доступа SCMA и WSMA.

Информация об авторах:*Бакулин Михаил Германович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Бен Режеб Тауфик Бен Камель, декан, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Крейнделин Виталий Борисович, заведующий кафедрой, профессор, д.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Панкратов Денис Юрьевич, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Смирнов Алексей Эдуардович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия***Для цитирования:***Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Анализ эффективности различных схем организации неортогонального множественного доступа NOMA // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 4-11.***For citation:***Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. (2023) Analysis of different NOMA schemes efficiency. T-Comm, vol. 17, no.1, pp. 4-11. (in Russian)*

1. Введение

От поколения к поколению систем мобильной связи менялись частотные диапазоны, методы модуляции, методы помехоустойчивого кодирования, шифрования и многое другое. Однако, эволюция систем мобильной связи от первого до пятого поколения (1G – 5G) не затронула технологии множественного доступа и по сей день мы используем методы ортогонального множественного доступа OMA (Orthogonal Multiple Access).

Основной причиной перехода от систем OMA к системам NOMA [2, 5, 13, 15] является резко возросшие требования к емкости сети. Традиционные технологии множественного доступа не могут обеспечить требования к емкости, диктуемые Интернетом вещей и новыми услугами. Кроме того, дальнейшее использование систем OMA становится очень затруднительным, так как связано с ограничением количества ортогональных ресурсов. Таким образом, возможности традиционных технологий ортогонального множественного доступа исчерпаны и требуется использование новых схем множественного доступа NOMA в качестве новой фундаментальной технологии сетей связи будущего.

Частично попытки внедрения неортогонального доступа NOMA были предприняты в стандарте систем 5G New Radio [2], [6], [15], но это были лишь попытки. Идея использования одного и того же ортогонального ресурса (частотного или временного) для организации связи с несколькими абонентами очень перспективна, и именно поэтому ведущие мировые производители телекоммуникационного оборудования направили все силы своих научно-исследовательских подразделений на работу в этом направлении. Исследовательский ажиотаж и конкурентные исследования разработчиков привели к появлению разных разновидностей неортогонального множественного доступа NOMA.

Первой и одной из наиболее распространенных в литературе схемой стала PD-NOMA [2] (Power domain NOMA), предполагающая разделение абонентов внутри одного ортогонального ресурса по уровню мощности. Схеме PD-NOMA посвящено большое количество публикаций по причине того, что ее использование порождает большое количество вспомогательных задач, таких как: группирование пользователей, управление мощностью и последовательная демодуляция. В качестве второго глобального направления среди схем NOMA необходимо выделить множественный доступ с разделением по структуре сигнала. Именно в качестве направления, так как в данный момент существует несколько схем, организующих множественный доступ с разделением по структуре сигнала, например, с помощью кодовых книг или кодовых последовательностей.

Конкурентная борьба разработчиков привела к появлению множества разновидностей систем NOMA и на текущий момент многие из них рассматриваются в качестве технологических кандидатов в рамках международной стандартизации систем мобильной связи 5G, B5G (Beyond 5G) и 6G. Следует выделить наиболее перспективные и получившие широкое распространение в литературе схемы неортогонального доступа NOMA [2], [7], [8], [13], [15]:

– множественный доступ кодовым разделением с прореженными последовательностями LDS-CDMA (Low Density Spreading Code Division Multiple Access);

- множественный доступ с прореженным кодовым разделением SCMA (Sparse Code Multiple Access);
- множественный доступ с расширением на основе последовательностей Велча WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access)
- множественный доступ с разделением по перемежению IDMA (Interleave Division Multiple Access);
- множественный доступ с разделением по шаблону PDMA (Pattern Domain Multiple Access);
- многопользовательский общий доступ MUSA (Multi-User Shared Access).

В данной статье рассмотрены схемы SCMA и WSMA как наиболее конкурирующие между собой разновидности технологий NOMA, произведено их сравнение между собой, а также с традиционной схемой ортогонального доступа OMA.

2. Множественный доступ с прореженными последовательностями SCMA

Рассмотрим сначала подробнее схему неортогонального множественного доступа с прореженными кодовыми последовательностями SCMA [14]. Для лучшего понимания принципа работы такой схемы будем оперировать следующими ключевыми обозначениями:

- K – количество абонентов в системе;
- N_{res} – число имеющихся ортогональных ресурсов, выделенных для организации множественного доступа.

Система SCMA работает в режиме перегрузки [9], т.е. выполняется следующие условие, являющееся особенностью всех разновидностей систем NOMA:

$$K > N_{res}. \quad (1)$$

Это означает, что K абонентов используют N_{res} ресурсов, т.е. сигналы K абонентов передаются с помощью ограниченного количества N_{res} физических ресурсов, что подразумевает использование одного и того же ресурса несколькими абонентами одновременно. Таким образом, если, например, два абонента используют один и тот же ресурс, то можно говорить о системе как перегруженной.

Правило распределения ресурсов между абонентами системы определяется кодовой книгой [12], представляющей собой набор матриц, содержащих столбцы (кодовые слова), с заданными точками созвездия для каждого используемого ресурса для каждого пользователя системы.

Третьим важным параметром систем SCMA является кратность модуляции, а если точнее, то количество столбцов (кодовых слов) $N_{codewords}$, которое содержит каждая матрица кодовой книги, предназначенная определенному абоненту. При этом говорить о модуляции применительно для систем SCMA будет некорректно в контексте понимания принципов ее работы. Для традиционных систем OMA кратность модуляции говорит о количестве точек выбранного метода модуляции, например, QPSK (4 точки созвездия) или 64-QAM (64 точки созвездия).

Следует отметить, что для системы SCMA смена конфигурации (параметров K и N_{res}) требует также и смены используемой кодовой книги. В связи с этим, одной из наиболее перспективных задач в развитии систем множественного доступа с прореженными последовательностями является синтез

новых кодовых книг для различных конфигураций системы NOMA.

Рассмотрим подробнее процесс формирования сигнала SCMA на примере известной кодовой книги [1] для конфигурации 4x4x6 ($N_{res} = 4, N_{codewords} = 4, K = 6$). Представленная в [1] кодовая книга имеет следующую структуру (рис. 1).

Таблица 1

Кодовая книга SCMA для конфигурации 4x4x6

№ абонента	Кодовая книга			
1	0	0	0	0
	$-0,1815 - 0,1318i$	$-0,6351 - 0,4615i$	$0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 + 0,1318i$
	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
2	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	0	0	0	0
	$-0,1815 - 0,1318i$	$-0,6351 - 0,4615i$	$0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 + 0,1318i$
	0	0	0	0
3	$-0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 - 0,1318i$	$-0,1815 + 0,1318i$	$0,6351 - 0,4615i$
	$0,1392 - 0,1759i$	$0,4873 - 0,6156i$	$-0,4873 + 0,6156i$	$-0,1392 + 0,1759i$
	0	0	0	0
	0	0	0	0
4	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	$-0,0055 - 0,2242i$	$-0,0193 - 0,7848i$	$0,0193 + 0,7848i$	$0,0055 + 0,2242i$
5	$-0,0055 - 0,2242i$	$-0,0193 - 0,7848i$	$0,0193 + 0,7848i$	$0,0055 + 0,2242i$
	0	0	0	0
	0	0	0	0
	$-0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 - 0,1318i$	$-0,1815 + 0,1318i$	$0,6351 - 0,4615i$
6	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	$0,1392 - 0,1759i$	$0,4873 - 0,6156i$	$-0,4873 + 0,6156i$	$-0,1392 + 0,1759i$
	0	0	0	0

На рисунке 1 показан пример формирования группового сигнала SCMA [3]. Основной идеей, изложенной на рисунке 1, является иллюстрация использования кодовых слов (столбцов) каждой кодовой матрицы в качестве выбранного значения комплексного информационного символа, соответствующего заданной последовательности бит. На рисунке 1 проиллюстрирована кодовая книга, каждая матрица которой содержит четыре кодовых слова, что соответствует двухбитовой модуляции.

Следует отметить, что представленная в таблице 1 и на рисунке 1 кодовая книга содержит нулевые элементы, именно поэтому такие книги являются прореженными. Прореженный характер кодовых книг позволяет обеспечить низкую вычислительную сложность при демодуляции информационных символов сигналов всех пользователей.

Из рисунка 1 видно, что каждый пользователь выбирает кодовое слово из своей кодовой книги, соответствующее передаваемой битовой информационной последовательности, после чего все выбранные кодовые слова складываются, образуя групповой сигнал SCMA. Значения ненулевых элементов и их расположение внутри кодовых книг выбираются путем оптимизации характеристик помехоустойчивости системы SCMA, что является одной из серьезных исследовательских задач в области систем беспроводной связи будущих поколений.

При использовании кодовой книги каждому из K пользователей выделяется кодовая матрица, состоящая из N_{res} строк и $N_{codewords}$ столбцов. Поэтому каждая кодовая матрица X_k имеет размерность $N_{res} \times N_{codewords}$ и может быть представлена в виде:

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kN_{codewords}} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_{res} \times N_{codewords}}. \quad (2)$$

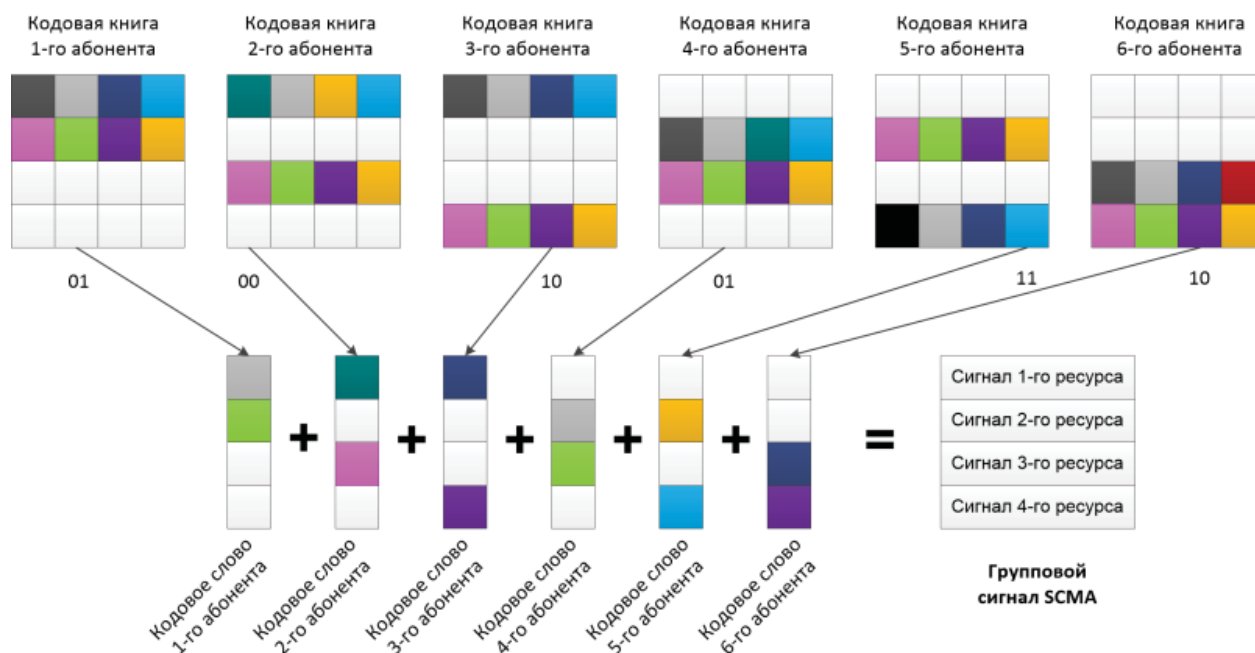


Рис. 1. Процесс формирования сигнала SCMA

Каждый столбец кодовой матрицы \mathbf{X}_k (2) соответствует своему значению комплексного информационного символа. Например, если используется модуляция с четырьмя точками созвездия, то $N_{codewords} = 4$, а число бит, соответствующих одному символу, будет равно $\log_2(M) = \log_2(4) = 2$.

Тогда кодовая книга каждого пользователя будет иметь $N_{codewords} = 4$ столбца и

- для передачи комбинации бит {00} используется 1-й столбец \mathbf{X}_k ;
- для передачи комбинации бит {01} используется 2-й столбец \mathbf{X}_k ;
- для передачи комбинации бит {10} используется 3-й столбец \mathbf{X}_k ;
- для передачи комбинации бит {11} используется 4-й столбец \mathbf{X}_k .

Рассмотрим подробнее модель сигнала SCMA в «нисходящем» канале (рис. 2)

Рис. 2).

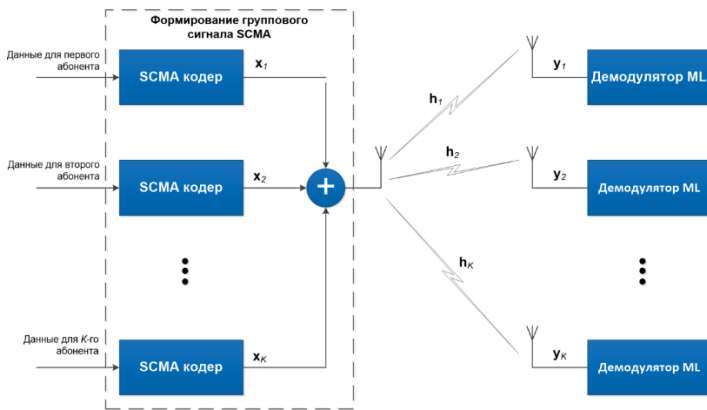


Рис. 2. Структура системы SCMA на линии “вниз” DL

В случае нисходящего канала формирование группового сигнала SCMA, состоящего из сигналов, предназначенных абонентам, производится на передающей стороне базовой станции. Наблюдаемый сигнал на входе приемника i -го пользователя можно представить в следующей форме [3], [5]:

$$\mathbf{y}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i) \cdot \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_i, \quad (3)$$

где $\mathbf{y}_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{iN_{res}}]^T$ – наблюдаемый сигнал на входе приемника i -го пользователя; $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ \dots \ h_{iN_{res}}]$ – вектор комплексных множителей канала для i -го пользователя; $\mathbf{x}_k = [x_{k1} \ x_{k2} \ \dots \ x_{kN_{res}}]^T$ – передаваемое кодовое слово пользователя; P_k – мощность сигнала для k -го пользователя; $\boldsymbol{\eta}_i$ – комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу $2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{1}$.

В случае «восходящего» канала каждый пользователь формирует собственный сигнал SCMA и сложение сигналов пользователей производится уже в канале (рис. 3).

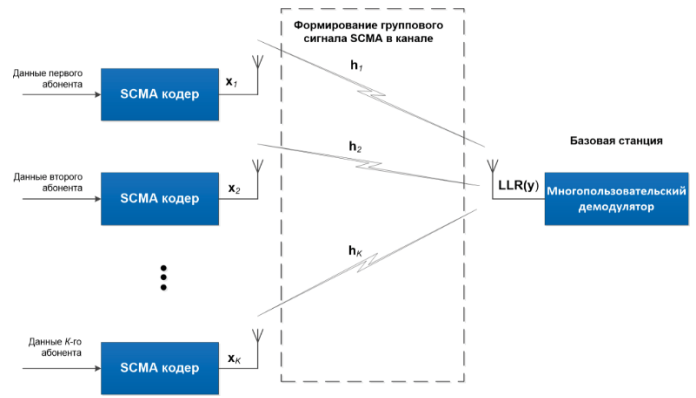


Рис. 3. Структура системы SCMA на линии “вверх” UL

Сигнал, наблюдаемый на входе приёмника базовой станции, можно представить следующим образом:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \cdot \text{diag}(\mathbf{h}_k) \cdot \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}, \quad (4)$$

где \mathbf{y} – вектор наблюдаемых сигналов абонентов на входе приёмника базовой станции; $\mathbf{h}_k = [h_{1k} \ h_{2k} \ \dots \ h_{N_{res}k}]$ – вектор комплексных множителей канала для k -го пользователя; $\boldsymbol{\eta}$ – N_{res} -мерный комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу $2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{1}$. Остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в (3).

Кодовая книга определяет порядок распределения физических ресурсов между пользователями. Однако, часто в литературе, посвященной технологии NOMA, для случая прореженных кодовых последовательностей SCMA используются фактор-графы [1], [3], [4], позволяющие наглядно проиллюстрировать порядок распределения физических ресурсов между пользователями.

Фактор-граф содержит вершины (узлы) пользователей (изображены в виде кружков) и вершины (узлы) ортогональных ресурсов (изображены в виде квадратов). Пример фактор-графа приведен на рисунке 4.

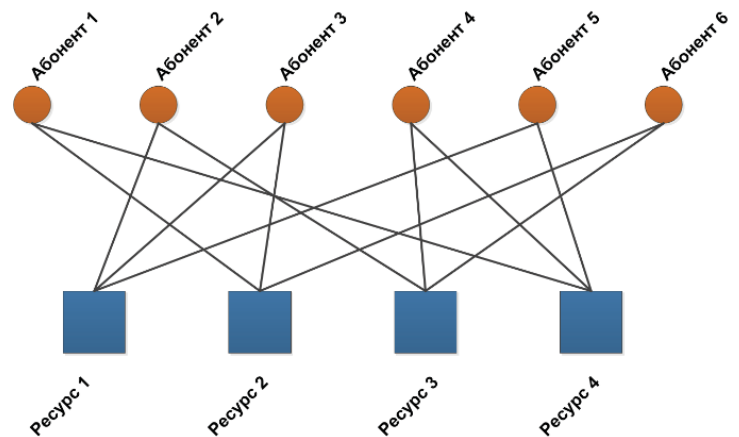


Рис. 4. Пример фактор-графа системы SCMA

Изображенный на рисунке 4 фактор-граф соответствует системе SCMA конфигурации 4x4x6. Читая фактор-граф необходимо следующим образом: если узел пользователя соединен с узлом ресурса, то значит этот ресурс используется пользователем, в противном случае ресурс не используется данным пользователем. В фактор-графе на рисунке 4 каждый пользователь использует только два ресурса из имеющихся четырех ресурсов. В то же время на каждом ортогональном ресурсе размещены сигналы трех пользователей.

Вторым удобным и наглядным способом представления правил распределения ресурсов между пользователями в системе SCMA, встречающимся в литературе, является матрица распределения ресурсов.

Фактор-графу, изображенному на рисунке 5, соответствует следующая матрица распределения ресурсов:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Столбцы матрицы (5) соответствуют пользователям, а строки физические ресурсы. При этом, если k -й пользователь использует j -й ресурс, то элемент матрицы принимает значение 1, в противном случае значение 0.

Описанные способы распределения ресурсов между пользователями системы SCMA являются эквивалентными.

3. Множественный доступ с расширением на основе последовательностей Велча WSMA

Второй рассматриваемой разновидностью системы NOMA является схема множественного доступа с расширением на основе последовательностей Велча WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access).

Синтез таких последовательностей Велча осуществляется путем сравнения общей корреляции TSC (Total Squared Correlation) с границей Велча [10]. При генерировании кодовых последовательностей WSMA одновременно оптимизируются такие показатели, как емкость системы и уровень корреляции между последовательностями. Однако, использование последовательностей Велча может привести к резкому увеличению сложности приёмника. Во избежание повышенной сложности реализации приёмника необходимо обеспечить ортогональность между определенным подмножеством векторов в данном наборе и соответствие границе Велча. Сгенерированный набор последовательностей, удовлетворяющих границе Велча формирует результирующую кодовую книгу WSMA.

Количество последовательностей соответствует количеству абонентов K в системе WSMA. Таким образом, имеется K векторов $\mathbf{s}_k, k = 1, \dots, K$ длиной N_{res} , обозначающих кодовые последовательности пользователей, для которых $\|\mathbf{s}_k\| = \sum_{l=1}^{N_{res}} s_{k,l}^2 = 1$. При этом матрица последовательностей имеет структуру $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$ и размер $N_{res} \times K$.

Рассмотрим общее векторное представление многопользовательской системы WSMA для линии «вниз» DL в следующем виде:

$$\mathbf{y}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i) \cdot \sum_{k=1}^K \mathbf{s}_k x_k + \boldsymbol{\eta}_i \quad (6)$$

Аналогично на линии «вверх» UL имеем следующую модель

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{h}_k) \mathbf{s}_k x_k + \boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

В схеме WSMA для каждого абонента задается конкретный вектор из набора заранее спроектированных векторов (последовательностей) размерности N_{res} . Эти векторы обладают определенными корреляционными свойствами.

Коэффициент загрузки системы WSMA определяется соотношением K/N_{res} , причем для поддержки большого числа абонентов необходимо, чтобы $(K/N_{res} > 1)$.

Граница Велча, используемая для формирования набора последовательностей может быть выражена следующим образом:

$$B_{Welch} = K^2 / N_{res} \quad (8)$$

Равенство (8) представляет собой границу взаимной корреляции любого набора из K последовательностей длины N_{res} (суммы квадратов взаимной корреляции последовательностей).

Коэффициент общей корреляции TSC, который ограничивается равенством (8), задается с помощью соотношения [10]:

$$TSC = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K |\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j|^2 \geq K^2 / N_{res}, \quad (9)$$

где \mathbf{s}_i и \mathbf{s}_j – последовательности для абонентов системы, образующие матрицу последовательностей WBE $\mathbf{S}^{N_{res} \times K} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$. В случае выполнения (9) множество последовательностей \mathbf{S} соответствует границе Велча, при этом векторы $\mathbf{s}_k, k = 1, \dots, K$ соответствуют границе Велча в совокупности, но не по отдельности.

В системах WSMA обработка производится на уровне символов, т.е. преобразования с помощью последовательностей WBA производятся над символами на выходе модулятора. Результатом умножения символов на выходе модулятора на последовательности WBA является матричная структура. Выбор последовательностей производится исходя из критерия максимизации пропускной способности.

На рисунке 5 приведена структура системы WSMA на линии «вниз» DL.

В таблице 2 приведен пример набора последовательностей, указанный в документе 3GPP [11], и предназначенный для восьми активных абонентов ($K = 8, N_{res} = 4$).

Конфигурация системы WSMA $K = 8, N_{res} = 4$ подразумевает, что загрузка системы составляет 200%. Каждый столбец кодовой книги – это комплексная WBE-последовательность с единичной нормой, которая назначается соответствующему абоненту.

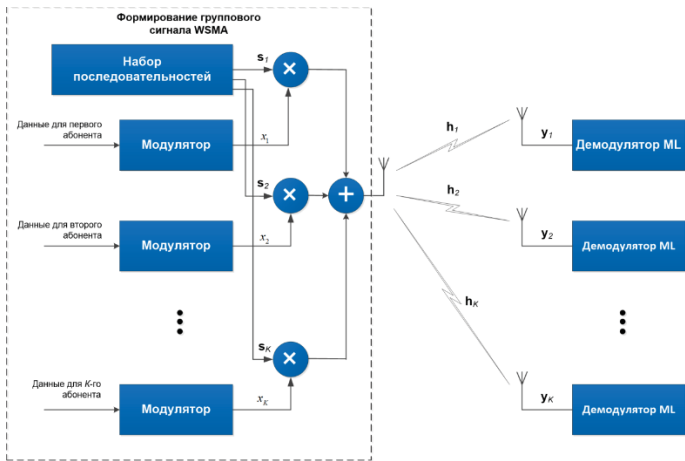


Рис. 5. Структура системы WSMA на линии «вниз» DL

Таблица 2

Пример кодовой книги WSMA, предложенной в стандарте 3GPP, для конфигурации $K = 8, N_{res} = 4$ [11]

№ Re-сурс	№			
	1	2	3	4
1	$[-0,6617 + 0,1004i]$	$[-0,0912 + 0,4191i]$	$[0,4151 + 0,3329i]$	$[0,2736 - 0,4366i]$
2	$[0,0953 + 0,4784i]$	$[-0,4246 - 0,0859i]$	$[0,2554 - 0,3140i]$	$[0,5452 + 0,2068i]$
3	$[-0,4233 - 0,1399i]$	$[-0,4782 + 0,3752i]$	$[-0,3808 + 0,1569i]$	$[-0,4690 - 0,2225i]$
4	$[-0,1265 + 0,3153i]$	$[-0,4936 + 0,1233i]$	$[0,6130 + 0,0873i]$	$[-0,3399 + 0,0974i]$
№ От-счета	№			
	5	6	7	8
1	$[-0,4727 - 0,1234i]$	$[-0,3413 + 0,1257i]$	$[0,4216 + 0,1187i]$	$[0,4603 + 0,2142i]$
2	$[0,0592 - 0,6432i]$	$[0,3671 - 0,1430i]$	$[-0,0241 - 0,5620i]$	$[0,0048 - 0,4244i]$
3	$[0,3493 - 0,1988i]$	$[0,6514 - 0,0660i]$	$[-0,4507 - 0,0958i]$	$[0,4047 + 0,1601i]$
4	$[-0,0975 + 0,4161i]$	$[0,2174 + 0,4864i]$	$[-0,5167 + 0,1116i]$	$[-0,4908 + 0,3629i]$

4. Результаты компьютерного моделирования

Сравнение эффективности схем SCMA и WSMA производилось с помощью компьютерного моделирования. Результаты компьютерного моделирования позволяют сравнить помехоустойчивость систем SCMA и WSMA, работающих в режиме перегрузки (150%, 4 физических ресурса, 6 абонентов), и обычной системы OMA работающей в обычном режиме без перегрузки (4 физических ресурса, 4 абонента). Данные конфигурации выбраны специально для отображения преимуществ в спектральной эффективности систем SCMA и WSMA по сравнению с традиционной системой OMA. Результаты получены при использовании 4 физических ресурсов, но при этом системы SCMA и WSMA позволяют увеличить емкость системы в 1,5 раза при приемлемых потерях в помехоустойчивости. Результаты моделирования получены для канала связи с дружными замираниями с использованием турбокодирования со скоростью $\frac{1}{2}$.

Для системы OMA при моделировании использовалась модуляция QPSK.

Результаты моделирования получены с переменным количеством экспериментов для разных точек ОСШ для повышения адекватности моделирования. Результаты моделирования для точек от 2 до 12 дБ получены с помощью усреднения наблюдений 5000 экспериментов, для точек ОСШ от 14 до 18 дБ с помощью 10000 экспериментов, для точек ОСШ от 20 до 28 использовались результаты усреднения 20000 экспериментов. Кратко параметры моделирования приведены в таблице 3

Таблица 3

Параметры компьютерного моделирования

Множественный доступ	1. Не ортогональный доступ SCMA (4 физических канала); 2. Не ортогональный доступ WSMA (4 физических канала); 3. Ортогональный доступ OMA (4 физических каналов), Модуляция QPSK.
Количество абонентов	OMA – 4 абонента; SCMA – 6 абонентов; WSMA – 6 абонентов.
Канал	Релеевский канал с замираниями (дружные по ресурсам, времени и по абонентам) на линии DL; Релеевский канал с замираниями (дружные по ресурсам и по времени, независимые по абонентам) на линии UL.
Длина кадра	568 бит
Помехоустойчивое кодирование	Турбокодер со скоростью 1/2
Демодуляция	Мягкая оценка. Логарифм отношений правдоподобия.
Количество экспериментов	5000 – 20000

На рисунке 6 приведены зависимости величин FER (вероятность появления ошибочного кадра) от отношения сигнал/шум в канале для систем SCMA, WSMA и традиционной схемы ортогонального доступа OMA для случая применения помехоустойчивого кодирования в «нисходящем» канале.

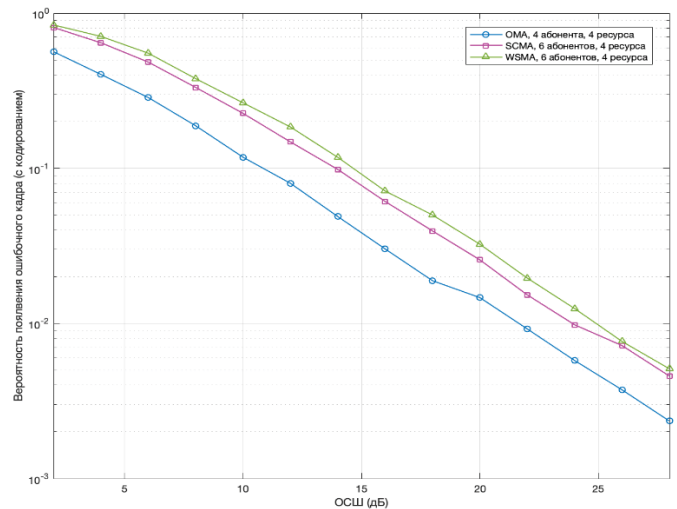


Рис. 6. Сравнение помехоустойчивости схем SCMA, WSMA и OMA в нисходящем канале с помехоустойчивым кодированием

Энергетический выигрыш традиционной схемы OMA составляет 2,1 дБ и 3,2 дБ по уровню FER 10^{-2} для схем SCMA и WSMA, соответственно. Схемы неортогонального доступа проигрывают по помехоустойчивости, но важно помнить, что этот энергетический проигрыш является платой за увеличенную емкость системы. Для рассмотренных конфигураций схем неортогонального доступа перегрузка составляет 150% и отмеченный энергетических проигрыш является компромиссом увеличенной в 1,5 раза емкости сети.

На рисунке 7 приведены зависимости величин FER для случая применения помехоустойчивого кодирования в «восходящем» канале.

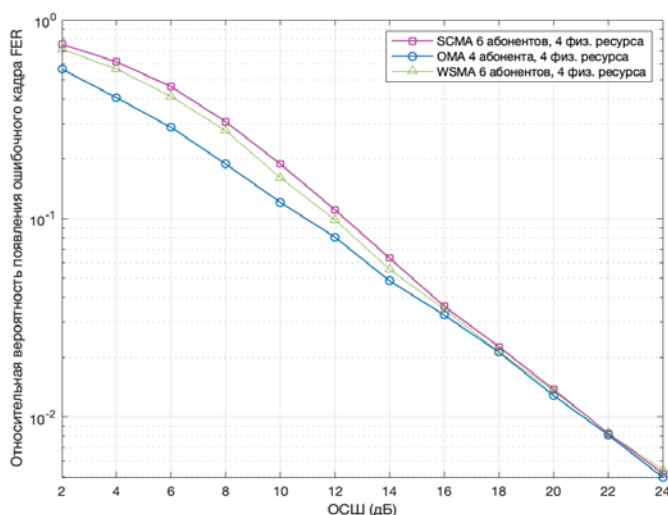


Рис. 7. Сравнение помехоустойчивости схем SCMA, WSMA и OMA в восходящем канале с помехоустойчивым кодированием

В восходящем канале результаты помехоустойчивости выглядят иначе. Энергетический выигрыш традиционной схемы OMA составляет всего лишь 0.2 дБ по сравнению со схемами SCMA и WSMA по уровню FER 10^{-2} . Между собой схемы SCMA и WSMA не имеют значительного лидерства в помехоустойчивости в восходящем канале, наблюдается лишь незначительный выигрыш схемы WSMA перед схемой SCMA в 0,02 дБ по уровню FER 10^{-2} .

Методы неортогонального доступа позволяют ощутимо увеличить емкость сети, при этом в нисходящем канале схема SCMA обладает лучшей помехоустойчивостью. Кроме того, необходимо отметить, что в рамках данной работы при моделировании использовался одинаковый алгоритм демодуляции. Однако, схема SCMA относится к разряду прореженных разновидностей NOMA, что позволяет использовать более простые итерационные алгоритмы типа MPA (Message Passing Algorithm) [1, 13].

Заключение

Главный принцип неортогонального множественного доступа – использование одного частотно-временного ресурса несколькими пользователями. Конечно, эта идея известна разработчикам и исследователям, но она до сих пор не использовалась в качестве ключевой фундаментальной технологии систем мобильной связи. Сейчас использование этой идеи уже диктуется эволюцией самих систем связи, а точнее их резко возросшей емкостью.

Технологии множественного доступа, основанные на этой идее, в том числе рассмотренные схемы SCMA и WSMA, были предложены относительно недавно. Здесь в этой статье мы попытались лишь изложить основные принципы этих схем множественного доступа, а также проиллюстрировать их преимущества перед традиционными системами OMA. Огромное количество задач еще стоит перед исследователями и разработчиками: необходимы новые алгоритмы приёма, оптимизация кодовых книг, снижение вычислительной сложности. Кроме того, одним из самых интересных направлений исследований является возможность применения технологий множественного доступа с уже хорошо зарекомендовавшими себя другими технологиями, например, методы полного дуплекса FD или технология MIMO.

Литература

1. Altera Innovate Asia website, Presentation “1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA”, <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
2. Qu Luo, Pengyu Gao, Zilong Liu, Lixia Xiao, Zeina Mheich, Pei Xiao, Amine Maaref. An Error Rate Comparison of Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access and Sparse Code Multiple Access // IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, vol. 2, pp. 500-511.
3. Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen. 5G and Beyond Wireless Systems. PHY Layer Perspective. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 425 p.
4. Климентьев В.П. Методы приема сигналов в системах множественного доступа с разреженным кодированием: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 167 с.
5. Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Switzerland, Springer, 2019. 670 p.
6. 3GPP TR 38.812 V16.0.0 (2018-12), Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
7. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 5. С. 4-14.
8. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Многостанционный доступ в системах связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2022. – № 5. С. 16-21.
9. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access // IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2013, pp. 332-336.
10. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №1. С. 4-14.
11. 3GPP, -166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_86/Docs/
12. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Способы минимизации объема передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 3. С. 17-24.
13. Y. Liu, Z. Qin, M. El-kashlan, Z. Ding, A. Nallanathan and L. Hanzo. Non-orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond // Proc. IEEE, vol. 105, no. 12. Dec. 2017, pp. 2347-2381.
14. Lisu Yu, Zilong Liu, Miaowen Wen, Donghong Cai, Shuping Dang, Yuhao Wang, and Pei Xiao. Sparse Code Multiple Access for 6G Wireless Communication Networks: Recent Advances and Future Directions. Submitted on 3 Apr 2021. [HTTPS://ARXIV.ORG/ABS/2104.01402v1](https://arxiv.org/abs/2104.01402v1)
15. Douglas H. Morais. Key 5G Physical Layer Technologies. Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 297 p.

ANALYSIS OF DIFFERENT NOMA SCHEMES EFFICIENCY

Mikhail G. Bakulin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, m.g.bakulin@gmail.com

Ben Rejeb Taoufik, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, benrejebt@yandex.ru

Vitaly B. Kreyndelin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vitkrend@gmail.com

Denis Y. Pankratov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, dpankr@mail.ru

Alexey E. Smirnov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, smirnov.al.ed@gmail.com

Abstract

Sixth generation 6G (Sixth Generation) wireless communication systems are the most popular direction of articles and literature. The main interest is the future standard of the 3GPP project, which defines the key technologies that will be used in the new generation of wireless communication systems. NOMA (Non-orthogonal multiple access) technology is one of the fundamental technologies for 6G systems. Using NOMA technology, it is possible to implement the concept of "Massive connectivity" for 6G systems, which assumes the provision of high capacity of future communication systems and more efficient use of the radio frequency spectrum. There are several schemes for organizing multiple NOMA access. The most promising of them are SCMA (Sparse Code Multiple Access) -and WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access). The main goal of this article is to compare the performance of non-orthogonal SCMA and WSMA schemes.

Keywords: 6G, Non-orthogonal multiple access, NOMA, codebook, SCMA, WSMA.

References

1. Altera Innovate Asia website, Presentation "1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENVI.0-SCMA", <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
2. Qu Luo, Pengyu Gao, Zilong Liu, Lixia Xiao, Zeina Mheich, Pei Xiao, Amine Maaref. "An Error Rate Comparison of Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access and Sparse Code Multiple Access," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 500-511.
3. Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen. 5G and Beyond Wireless Systems. PHY Layer Perspective. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 425 p.
4. V.P. Klimentev. Metody priema signalov v sistemah mnozhestvennogo dostupa s razrezhennim kodirovaniem: diss. kand. teh. nauk. St. Petersburg, 2018. 167 p. (in Russian)
5. Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Switzerland, Springer, 2019, 670 p.
6. 3GPP TR 38.812 V16.0.0 (2018-12), Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
7. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V. B. Kreyndelin, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov (2022), "Skhemy NOMA s obrabotkoj na urovne simvolov," *T-Comm*. Vol. 16. No. 5, pp. 4-14. (in Russian)
8. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, Yu.B. Mironov, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov (2022), "Mnogostacionnyj dostup v sistemah svyazi pyatogo i posleduyushchih pokolenij," *Elektrosvyaz*. No. 5, pp. 16-21. (in Russian)
9. H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," *IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Sep. 2013, pp. 332-336.
10. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov, "Tekhnologiya NOMA s kodovym razdeleniem v 3GPP: 5G ili 6G?" *T-Comm*. Vol 16. No.1, pp. 4-14. (in Russian)
11. 3GPP, -166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RLI/TSGR1_86/Docs.
12. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, A.E. Smirnov (2021), "Sposoby minimizacii ob'yoma peredavaemoj informacii v obratnom kanale mnogoantennyh sistem MIMO," *T-Comm*. Vol. 15. No. 3, pp. 17-24.
13. Y. Liu, Z. Qin, M. Elkashlan, Z. Ding, A. Nallanathan and L. Hanzo (2017), "Non-orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond". *Proc. IEEE*, vol. 105. no. 12. Dec. 2017, pp. 2347-2381.
14. Lisu Yu, Zilong Liu, Miaowen Wen, Donghong Cai, Shuping Dang, Yuhao Wang, and Pei Xiao. Sparse Code Multiple Access for 6G Wireless Communication Networks: Recent Advances and Future Directions. Submitted on 3 Apr 2021. <https://arxiv.org/abs/2104.01402v1>
15. Douglas H. Morais. Key 5G Physical Layer Technologies. Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer Nature Switzerland AG, 2020, 297 p.

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НАКЛОНА ДИСПЕРСИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОМ СТРАТОНОВИЧА И СИГМА-ТОЧЕЧНЫМ ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-12-19

Варламов Владимир Олегович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, varlamov@srd.mtuci.ru

Кандауров Николай Александрович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, kandaurov@srd.mtuci.ru

Лобова Елизавета Олеговна,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, lizabeth2@mail.ru

Лобов Евгений Михайлович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, lobov@srd.mtuci.ru

Manuscript received 12 November 2022;
Accepted 20 December 2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06055

Ключевые слова: частотная дисперсия ионосферного канала, нелинейная оптимальная фильтрация, точечная оценка, широкополосный сигнал, алгоритм фильтрации Стратоновича, сигма-точечный фильтр Калмана

В статье рассматриваются приём и передача широкополосных сигналов через ионосферный канал. Увеличение ширины спектра передаваемых сигналов приводит к существенному влиянию частотной дисперсии ионосферы Земли на качество приёма информации. Оценивание дисперсионных искажений широкополосных сигналов и компенсация их влияния в статье осуществляется методами оптимальной фильтрации. Проведено сравнение двух алгоритмов нелинейной оптимальной фильтрации наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала s : с использованием фильтра Стратоновича и с использованием сигма-точечного фильтра Калмана. В статье приведены общие аналитические выражения для вычисления оценки наклона дисперсионной характеристики для обоих алгоритмов: фильтрации Стратоновича и фильтрации с использованием сигма-точечного фильтра Калмана. Кроме того, приведены результаты имитационного моделирования, целью которого было сравнение двух вышеупомянутых алгоритмов фильтрации в рамках поставленной задачи. Исследованы три случая зависимости наклона ДХ от времени – марковский затухающий процесс, постоянный процесс и процесс со случайными приращениями для фазоманипулированных сигналов с разной шириной спектра в предположении больших отношений сигнал/шум. Показано, что для сигналов с шириной спектра от 500 кГц до 1 МГц сигма-точечный фильтр Калмана в среднем подстраивается в два раза быстрее, однако, среднеквадратическое отклонение оценки наклона дисперсионной характеристики от истинного значения в до 1.5 раз больше по сравнению с фильтром Стратоновича. Длительность подстройки фильтров уменьшается с уменьшением ширины спектра сигнала с 1 МГц до 250 кГц. В полосе 250 кГц оба рассматриваемых фильтра обладают приблизительно одинаковой скоростью подстройки и качеством фильтрации.

Информация об авторах:

Варламов Владимир Олегович, аспирант кафедры "Радиотехнические системы", Московский технический университет связи и информатики Москва, Россия

Кандауров Николай Александрович, к.т.н. заведующий лабораторией НИЛ4804, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Лобова Елизавета Олеговна, к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ4804, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Лобов Евгений Михайлович, доцент, к.т.н., заведующий лабораторией НИЛ4803, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

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. Том 17. №1. С. 12-19.

For citation:

Varlamov V.O., Kandaurov N.A., Lobova E.O., Lobov E.M. (2023) Comparison of the quality of optimal filtering of the slope of the dispersion characteristic by the Stratonovich filter and the unscented Kalman filter. *T-Comm*, vol. 17, no.1, pp. 12-19. (in Russian)

Введение

Системы связи декаметрового диапазона, благодаря своей надёжности и экономической эффективности, нашли широкое применение в задачах организации связи в труднодоступных регионах России и Мира. Наиболее актуальным направлением развития таких радиолиний является применение широкополосных сигналов с целью увеличения скорости передачи информации [1]. Однако, при передаче широкополосных сигналов частотная дисперсия ионосферы Земли приводит к существенным искажениям сигналов и, в итоге, к снижению качества приёма информации [2-6].

Оценка параметров частотной дисперсии ионосферы Земли с последующей компенсацией сопутствующих дисперсионных искажений необходима для повышения качества приема информации [7-11]. Так как характеристики частотной дисперсии ионосферы имеют свойство меняться во времени и первичные оценки упомянутых характеристик по преамбуле могут быть недостаточно точными, то актуальным является применение следующих алгоритмов, в том числе алгоритмов оптимальной фильтрации, которые нашли широкое применение в задачах оценки параметров канала [12,14].

Фильтрация наклона дисперсионной характеристики (параметр, характеризующий дисперсионные искажения [15]) с помощью фильтра Стратоновича уже была подробно рассмотрена авторами в работе [16]. В настоящей работе предлагается сравнить качество фильтрации наклона дисперсионной характеристики при применении с помощью фильтра Стратоновича и сигма-точечного фильтра Калмана. В качестве количественного показателя качества оценки была принята зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) оценки наклона ДХ от дискретного времени.

Постановка задачи

На выходе дискретного коррелятора наблюдаются зашумлённые квадратуры искажённого частотной дисперсией ионосферного сигнала квадратуры:

$$\begin{cases} y_{1i} = f_{1i}(s_i) + \mu_{1i}, & i = \overline{1 \div N}, \\ y_{2i} = f_{2i}(s_i) + \mu_{2i} \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu_{1i}, \mu_{2i}, i = \overline{1 \div N}$ – некоррелированные белые гауссовские шумы наблюдения на выходе коррелятора с нулевым средним и дисперсией σ_μ^2 , $s_i, i = \overline{1 \div N}$ – наклон дисперсионной характеристики (наклон ДХ), оцениваемый медленно меняющийся случайный процесс, характеризующий дисперсионные искажения,

$$\begin{aligned} f_{1i}(s_i) &= \sum_{k=-N_s/2}^{N_s/2-1} |\dot{X}_k|^2 \cos(\pi f_k^2 (s_i - \hat{s}_{oi})), \\ f_{2i}(s_i) &= \sum_{k=-N_s/2}^{N_s/2-1} |\dot{X}_k|^2 \sin(\pi f_k^2 (s_i - \hat{s}_{oi})), \end{aligned} \quad (2)$$

– нелинейные относительно наклона ДХ функции уравнений наблюдения, представляющие собой отсчёты на выходе дискретного коррелятора и учитывающие оценку наклона ДХ $\hat{s}_{oi}, i = \overline{1 \div N}$, где $\dot{X}_k, k = \overline{1 \div N_s}$ – спектральные

отсчёты полезного сигнала (коэффициенты дискретного преобразования Фурье полезного широкополосного сигнала длиной N_s отсчетов).

Вид уравнений (2) является следствием модели ионосферного канала [15], в соответствии с которой, его частотная характеристика в полосе до 1 МГц может быть описана в форме $\dot{H}(j2\pi f) = e^{-j\pi f^2 s}$, т.е. с помощью нелинейной квадратичной в зависимости от частоты зависимости фазового сдвига.

Полагается, что наклон дисперсионной характеристики является медленно меняющимся случайным процессом по сравнению с длительностью одного широкополосного сигнала при непрерывной их передаче, т.е. на интервале вычисления корреляционной суммы значение наклона ДХ s_i можно считать постоянным.

Уравнение изменения наклона ДХ (уравнение динамической системы) можно представить как:

$$s_i = C s_{i-1} + \xi_i \quad (3)$$

ξ_i – белый гауссовский шум динамической системы с нулевым средним и дисперсией σ_ξ^2 , C – постоянная. Шумы динамической системы и шумы наблюдения не являются коррелированными между собой.

Учитывая (3) \hat{s}_{oi} в (2) равна $\hat{s}_{oi} = C \hat{s}_{o(i-1)}$, $i = \overline{1 \div N}$, $\hat{s}_{o1} = C \hat{s}_{o0}$, \hat{s}_i – оценка наклона ДХ.

Оценивать случайный процесс s_i предлагается прямым методом нелинейной фильтрации (алгоритм Стратоновича) и с использованием сигма-точечного фильтра Калмана.

Алгоритм оптимальной нелинейной фильтрации Стратоновича для оценки наклона ДХ

Алгоритм нелинейной фильтрации с помощью алгоритма Стратоновича, предполагающего разложение нелинейных функций $f_{1i}(s_i), f_{2i}(s_i)$ в ряд Тейлора до линейного члена в окрестностях точки $C \hat{s}_{o(i-1)}$ был подробно приведён и исследован в статье [16], поэтому здесь будет приведён кратко.

С учётом выражений (1) – (3) прямой алгоритм нелинейной фильтрации представлен ниже:

$$\hat{s}_i = C \hat{s}_{i-1} + \mathbf{K}_i [\mathbf{Y}_i - \mathbf{F}_i], \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{X}_i \mathbf{P}_i [\mathbf{X}_i \mathbf{P}_i \mathbf{X}_i^T + \mathbf{Q}]^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_i = C^2 \Gamma_{i-1} + \sigma_\xi^2, \quad (6)$$

$$\Gamma_i = \mathbf{P}_i - \mathbf{K}_i \mathbf{X}_i \mathbf{P}_i, \quad (7)$$

где $i = \overline{1 \div N}$, $\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{bmatrix}$ – вектор уравнений наблюдения (1),

$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f_{1i}[C \hat{s}_{i-1}] \\ f_{2i}[C \hat{s}_{i-1}] \end{bmatrix}$ – вектор, содержащий первые члены ряда

Тейлора при разложении функций $f_{1i}(s_i), f_{2i}(s_i)$ в точке $C \hat{s}_{i-1}$, \mathbf{K}_i – коэффициент обратной связи фильтра,

$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} f'_{1i}[C \hat{s}_{i-1}] \\ f'_{2i}[C \hat{s}_{i-1}] \end{bmatrix}$ – вектор содержащий производные, полу-

ченные при линеаризации:

$$f'_{1i}[C_i \hat{s}_{i-1}] = - \sum_{k=-N_i/2}^{N_i/2-1} |\dot{X}_k|^2 \pi f_k^2 \sin(\pi f_k^2 (C_i \hat{s}_{i-1} - \hat{s}_{oi})) = 0$$

$$f'_{2i}[C_i \hat{s}_{i-1}] = - \sum_{k=-N_i/2}^{N_i/2-1} |\dot{X}_k|^2 \pi f_k^2 \cos(\pi f_k^2 (C_i \hat{s}_{i-1} - \hat{s}_{oi})) = - \sum_{k=-N_i/2}^{N_i/2-1} |\dot{X}_k|^2 \pi f_k^2,$$

P_i – априорная матрица корреляции оценок (в данном случае размера 1x1, так как оценивается только один параметр), Γ_i – апостериорная матрица корреляции оценок (в данном случае размера 1x1), начальное значение выбирается равным $\Gamma_0 = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{1 \times 1}$, $\mathbf{Q} = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2 \times 2}$ – матрица дисперсий шумов наблюдения, $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ – единичная матрица размера 2x2, \hat{s}_0 выбирается из априорных сведений.

Сигма-точечный фильтр Калмана

Приведём кратко алгоритм сигма-точечной фильтрации. Известно, что главной особенностью сигма-точечного фильтра Калмана является то, что априорная оценка неизвестного параметра рассчитывается как взвешенная сумма сигма-точек. Алгоритм фильтрации в данном случае имеет вид:

$$\hat{s}_i = \hat{s}_i^- + \mathbf{K}_i (\mathbf{Y}_i - \hat{\mathbf{Y}}_i), \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{L}_i^{-1}, \quad (9)$$

$$P_i = \sum_{k=0}^{2N} \omega_c^k (CS_i^k - \hat{s}_i^-) (CS_i^k - \hat{s}_i^-)^T + \sigma_\xi^2, \quad (10)$$

$$\Gamma_i = P_i - \mathbf{K}_i \mathbf{L}_i \mathbf{K}_i^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_i = \sum_{k=0}^{2N} \omega_c^k (S_i^k - \hat{s}_i^-) (\mathbf{F}(S_i^k) - \hat{\mathbf{Y}}_i)^T. \quad (12)$$

$$\mathbf{L}_i = \sum_{k=0}^{2N} \omega_c^k (\mathbf{F}(S_i^k) - \hat{\mathbf{Y}}_i) (\mathbf{F}(S_i^k) - \hat{\mathbf{Y}}_i)^T + \mathbf{Q}, \quad (13)$$

где $i = \overline{1 \div N}$, $\hat{s}_i^- = \sum_{k=0}^{2n} \omega^k CS_i^k$ – априорная оценка наклона ДХ,

$\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{bmatrix}$ – вектор уравнений наблюдения, $\hat{\mathbf{Y}}_i = \sum_{k=0}^{2n} \omega^k \mathbf{F}(S_i^k)$ –

средняя оценка уравнений наблюдения, где n – число оцениваемые параметров (в рассматриваемой задаче $n=1$),

$\mathbf{F}(S_i^k) = \begin{bmatrix} f_{1i}[S_i^k] \\ f_{2i}[S_i^k] \end{bmatrix}$ – вектор, содержащий рассчитанные в

сигма-точках нелинейные функции $f_{1i}(s_i)$, $f_{2i}(s_i)$, \mathbf{K}_i – коэффициент усиления фильтра Калмана, P_i – априорная дисперсия оценки, Γ_i – апостериорная дисперсия оценки, \mathbf{L}_i – матрица корреляции уравнений наблюдения, рассчитанных в сигма-точках, \mathbf{T}_i – взаимная матрица корреляции, $\mathbf{Q} = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2 \times 2}$ – матрица дисперсий шума наблюдения, S_i^k – сигма-точки, ω^k – весовые коэффициенты, использующиеся для аппроксимации среднего, ω_c^k – весовые коэффициенты использующиеся

для аппроксимации ковариации, $k=0,1,2$, \hat{s}_0 – выбирается из априорных сведений.

Сигма-точки S_i^k в случае оценки наклона ДХ рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} S_i^0 = s_{i-1}, \\ S_i^1 = s_{i-1} + \sqrt{1+\lambda} (\sqrt{\Gamma_{i-1}}), \\ S_i^2 = s_{i-1} - \sqrt{1+\lambda} (\sqrt{\Gamma_{i-1}}). \end{cases} \quad (14)$$

Весовые коэффициенты в выражениях равны

$$\omega^0 = \frac{\lambda}{\lambda+n}, \quad \omega^k = \frac{1}{2(\lambda+n)}, \quad \omega_c^0 = \frac{\lambda}{\lambda+n} + 1 - \alpha^2 + \beta,$$

$$\omega_c^k = \frac{1}{2(\lambda+n)}, \quad k=1, \dots, 2n.$$

Приведённые выражения для ω^k и ω_c^k содержат свободные параметры λ , α и β . Параметр α определяет разброс сигма-точек вокруг среднего, параметр β позволяет учесть априорные данные о функции плотности вероятности оцениваемого параметра, λ – параметр масштабирования равный $\lambda = \alpha^2(n+\kappa)$, $\kappa=3-n$, $n=1$ – порядок динамической системы (количество оцениваемых параметров). Подробнее о свободных параметрах, их возможных значениях и сигма-точечном фильтре Калмана приведено в работах [14,17].

Сравнение качества работы алгоритмов фильтрации наклона ДХ

Сравним качество фильтрации наклона ДХ фильтром Стратоновича и сигма-точечным фильтром Калмана. В качестве количественного показателя качества фильтрации было выбрано изменение во времени среднеквадратического отклонения (СКО) оценки наклона ДХ. Моделирование проводилось для ФМ-2 сигнала, сформированного на основе М-последовательности длиной 2047, при ОСШ 25 дБ после свертки. Дисперсия шума динамической системы $\sigma_\xi^2 = 0.0001$. Свободные параметры сигма-точечного фильтра Калмана были выбраны: $\kappa=2$, $\alpha=10^{-1}$ и $\beta=2$. В начальный момент времени значение наклона ДХ задано равным 80 мкс/МГц. Сравнение проводилось для сигналов с разной шириной спектра.

На рисунках 1 и 2 приведены графики зависимости выборочного СКО оценки изменяющегося со временем наклона ДХ от номера отсчёта при оценке фильтром Стратоновича и сигма-точечным фильтром Калмана. СКО приведено для оценки медленно растущего наклона ДХ, то есть при $C=1.0002$, начальное значение оценки было выбрано наиболее близким к истинному $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц.

На рисунках 3 и 4 СКО рассчитано также для $C=1.0002$, но начальное значение оценки наклона ДХ было выбрано равным $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц. Количество экспериментов $N_{\text{exp}} = 100$. Ширина спектра сигнала составила 1 МГц.

В качестве дополнительного примера на рисунках 5-8 приведено СКО для оценки медленно растущего наклона

ДХ, то есть при $C = 0.9995$, начальное значение оценки было выбрано наиболее близким к истинному $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц и $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц. В качестве иллюстрации работы фильтрации приведены графики изменения оценки и наклона ДХ от времени (одна реализация) для фильтра Стратоновича и сигма-точечного фильтра Калмана при трёх типах процесса: убывающего $C = 0.9995$, растущего $C = 1.0002$ и постоянно-го $C = 1$ (см. рис. 9-11). Начальное значение оценки наклона ДХ было выбрано равным $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц.

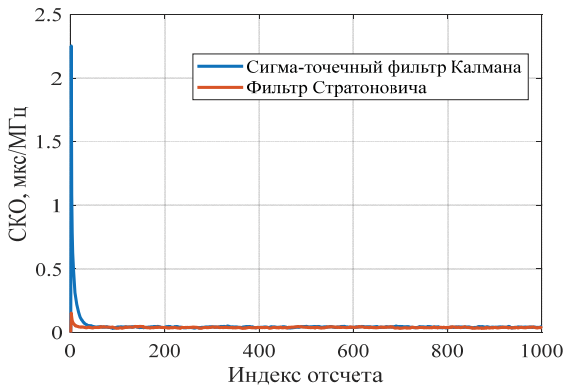


Рис. 1. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц

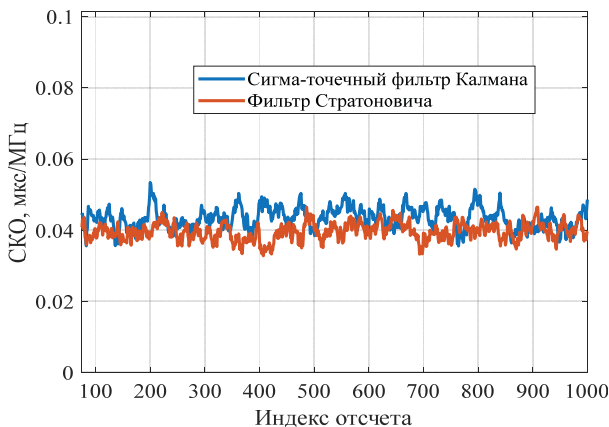


Рис. 2. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров

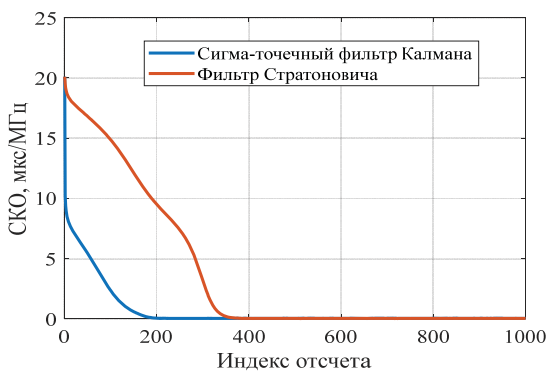


Рис. 3. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц

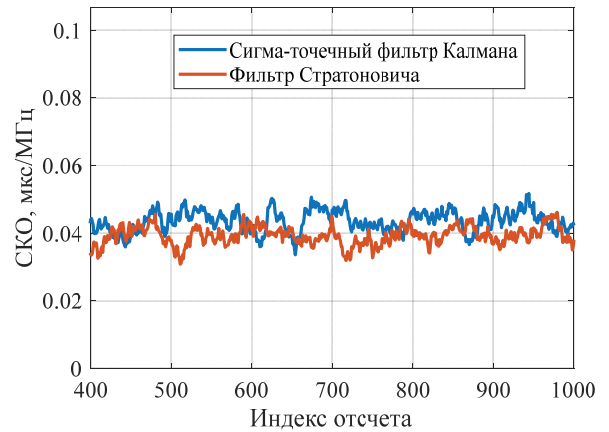


Рис. 4. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров

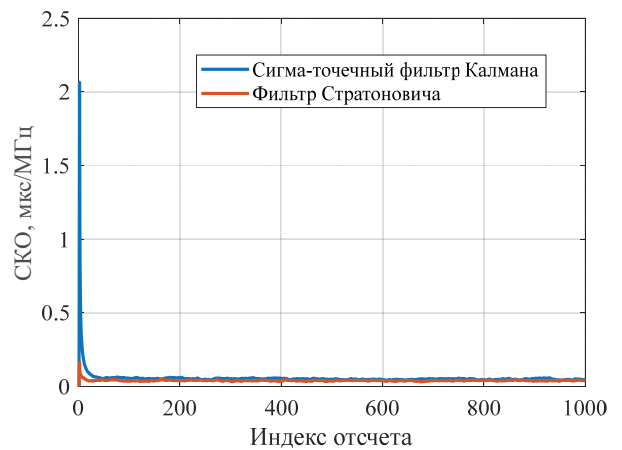


Рис. 5. Зависимость СКО оценки убывающего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц

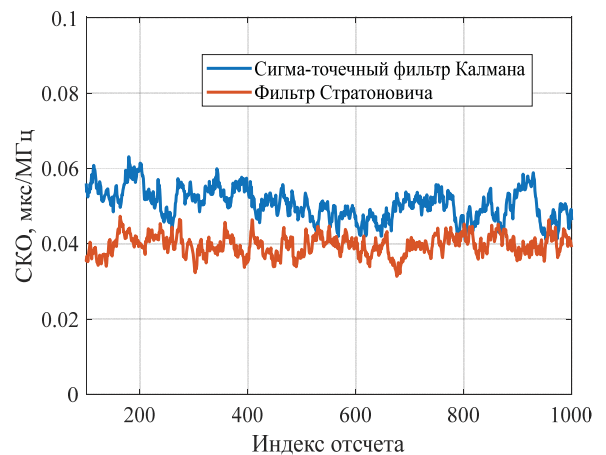


Рис. 6. Зависимость СКО оценки убывающего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 80$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров

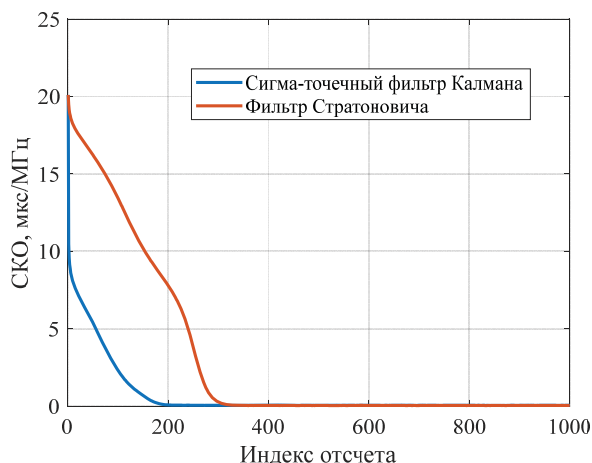


Рис. 7. Зависимость СКО оценки убывающего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц

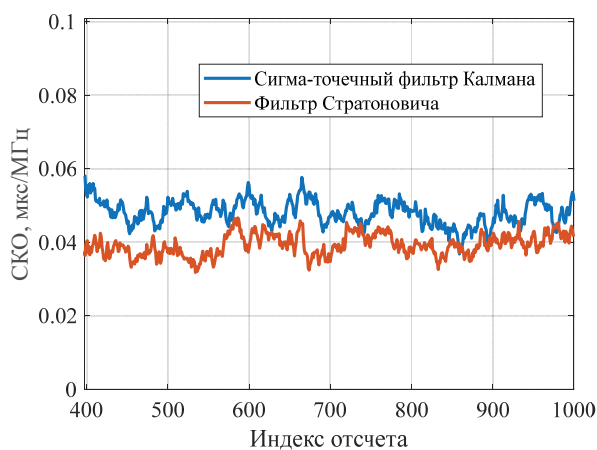
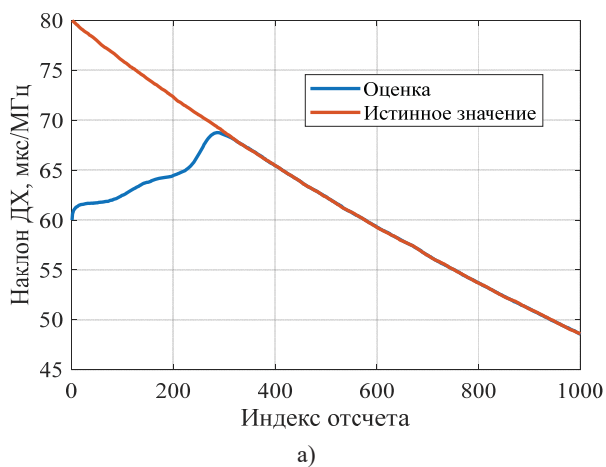
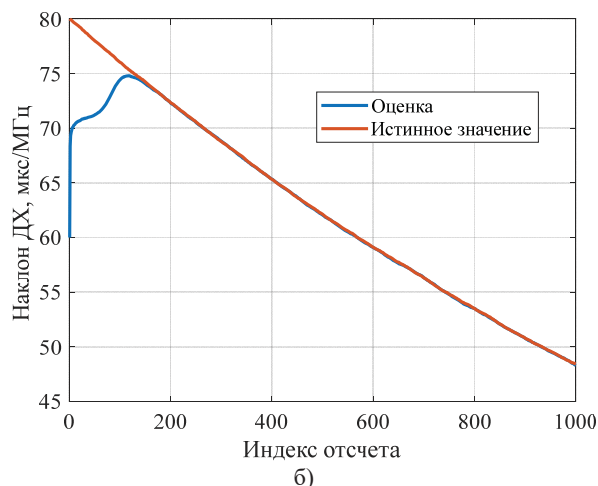


Рис. 8. Зависимость СКО оценки убывающего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров

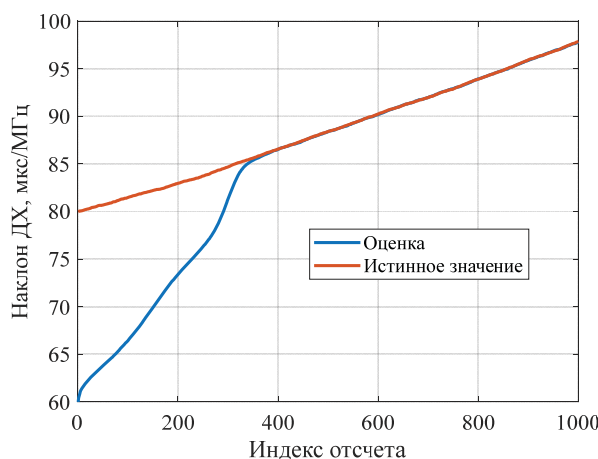


а)

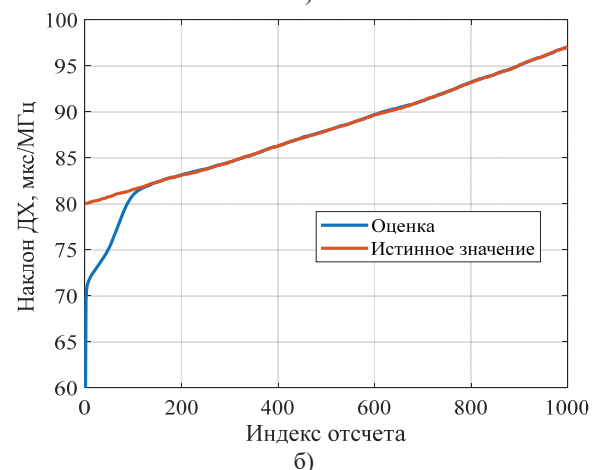


б)

Рис. 9. Зависимость оценки убывающего со временем наклона ДХ и его истинного значения от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц, полученная с помощью фильтра Стратоновича (а) и сигма-точного фильтра Калмана (б)



а)



б)

Рис. 10. Зависимость оценки растущего со временем наклона ДХ и его истинного значения от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц, полученная с помощью фильтра Стратоновича (а) и сигма-точного фильтра Калмана (б)

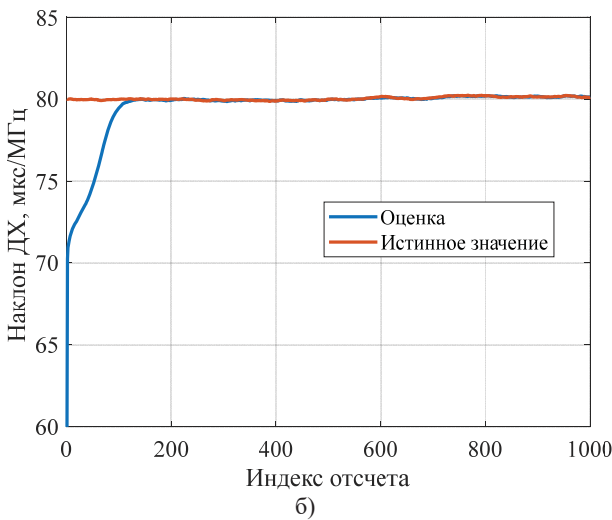
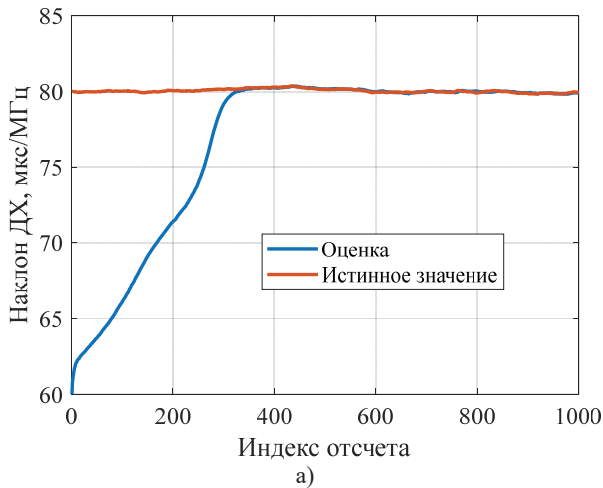


Рис. 11. Зависимость оценки постоянного наклона ДХ и его истинного значения от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц, полученная с помощью фильтра Стратоновича (а) и сигма-точечного фильтра Калмана (б)

Из всех вышеприведённых зависимостей можно сделать ряд **выводов**:

1. При заданных условиях алгоритм фильтрации с помощью сигма-точечного фильтра Калмана сходится приблизительно в два раза быстрее.
2. Для разных типов зависимости оцениваемого случайного процесса СКО меняется незначительно.
3. СКО оценки примерно одинаково для обоих алгоритмов фильтрации, однако, для фильтра Стратоновича значение СКО в 1,25 – 1,5 раза меньше.

На рисунках приведены зависимости СКО оценки наклона ДХ от индекса отсчёта по времени на примере растущего СП для сигналов с шириной спектра 500 кГц (см. рис. 12-13) и 250 кГц (см. рис. 14) при начальном значении оценки $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц.

Из приведённых зависимостей следует:

1. С уменьшением ширины спектра сигнала уменьшается количество отсчётов необходимое для подстройки фильтров и разница в скорости подстройки между исследуемыми фильтрами. С уменьшением ширины спектра разница в скорости подстройки между рассматриваемыми фильтрами сокращается. Например, для сигнала с шириной спектра

250 кГц подстройка происходит почти за одно и тоже время для обоих алгоритмов.

2. С уменьшением ширины спектра сигнала увеличивается СКО оценки наклона ДХ, что связано с уменьшением влияния частотной дисперсии на сигнал.

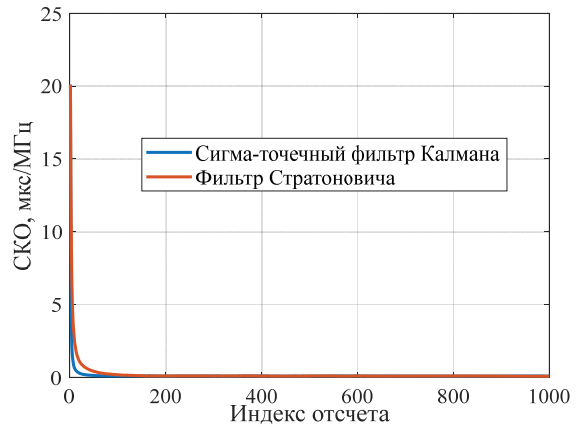


Рис. 12. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц (500 кГц)

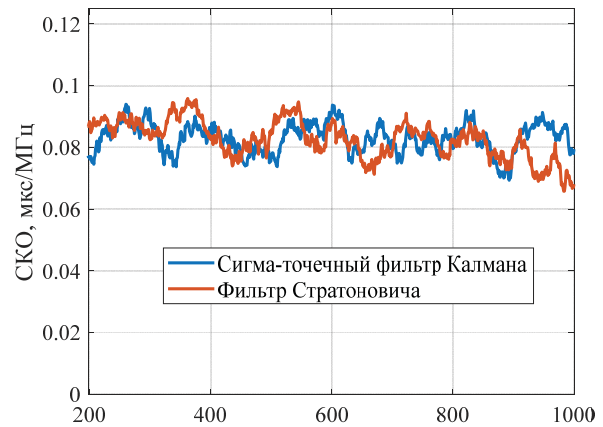


Рис. 13. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров (500 кГц)

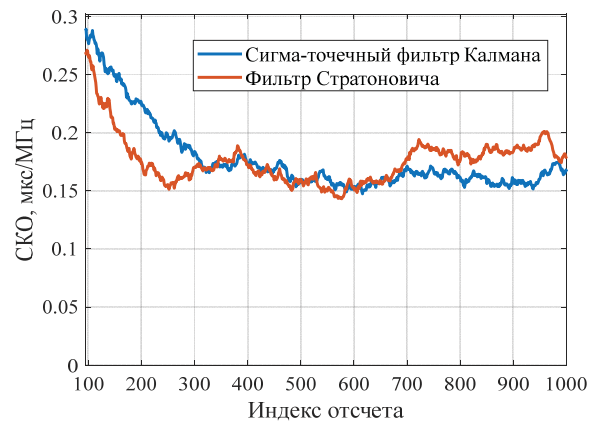


Рис. 14. Зависимость СКО оценки растущего со временем наклона ДХ от номера отсчёта дискретного времени при начальном значении $\hat{s}_0 = 60$ мкс/МГц после завершения подстройки обоих фильтров (250 кГц)

Заключение

В настоящей статье рассмотрено сравнение качества оценки двух алгоритмов фильтрации наклона ДХ: с помощью фильтра Стратоновича и с помощью сигма-точечного фильтра Калмана. Сравнение показало следующее:

1. С уменьшением ширины спектра сигнала уменьшается количество отсчетов необходимое для подстройки фильтров и разница в скорости подстройки между исследуемыми фильтрами: для сигнала с шириной спектра 1 МГц фильтр Стратоновича подстраивается примерно за 400 отсчетов, а сигма-точечный фильтр – примерно за 200, то есть сигма-точечный фильтр Калмана подстраивается в два раза быстрее; для полосы 500 кГц сигма-точечный фильтр Калмана подстраивается также примерно в два раза быстрее, однако, время подстройки обоих фильтров сократилось более, чем в два раза; для сигнала с шириной спектра 250 кГц подстройка происходит почти за одно и тоже время для обоих алгоритмов.

2. С уменьшением ширины спектра сигнала увеличивается СКО оценки наклона ДХ, что связано с уменьшением влияния частотной дисперсии на сигнал.

3. Для сигнала с шириной спектра 1 МГц СКО оценки наклона ДХ фильтром Стратоновича приблизительно в 1,25 – 1,5 меньше. Для полос шириной 250 кГц СКО практически не отличаются.

Литература

1. *Jorgenson M.B., Johnson R.W., Nelson R.W.* An Extension of Wideband HF Capabilities // IEEE Military Communications Conference. 2013. P. 1202-1206.
2. *Лобов Е.М., Смердова Е.О.* Качество обнаружения широкополосных сигналов в условиях дисперсионных искажений в ионосферной радиолинии // Телекоммуникации и телекоммуникационные технологии 2016. Т. 3, № 2. С. 61-62.
3. *Lobov E.M., Kandaurov N.A., Lobova E.O., Lipatkin V.I.* Investigation of the influence of dispersion distortions of wideband signals on the quality of their delay and frequency shift estimation // Synchroninfo journal 2021 vol. 7, №1. P. 11-16.
4. *Lipatkin V.I., Lobova E.O.* Broadband Noise-like Signal Parameters Joint Estimation Quality with Dispersion Distortions in the Ionospheric Channel // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. P. 6.
5. *Lobov E.M., Varlamov V.O., Sokolov K.Y.* Methods for increasing the computational efficiency of the algorithm for calculating the compensator for non-uniformity of the frequency response of analog filters

in a hybrid filter bank // 2020 Systems of Signal generating and processing in the field of board communications. 2020. P. 4.

2. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В.* Адаптивное обнаружение широкополосного сигнала при зондировании многомерного канала КВ связи // XII Всероссийская конф. «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2018. С. 196-200.

7. *Лобов Е.М., Косилов И.С., Кандауров Н.А., Елсуков Б.А.* Качество максимально правдоподобной оценки наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала широкополосными зондирующими сигналами // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов 2015 Т. 6, №4. С. 162-164.

3. *Lipatkin, V.I., Lobov, E.M., Kandaurov N.A.* Computationally Efficient Implementation of Joint Detection and Parameters Estimation of Signals with Dispersive Distortions on a GPU // 2022 Sensors 2022, 22, 3105.

4. *Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Е.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.

10. *Lipatkin V.I., Lobov E.M., Lobova E.O., Kandaurov N.A.* Cramer-Rao Bounds for Wideband Signal Parameters Joint Estimation in Ionospheric Frequency Dispersion Distortion Conditions // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2021. 2021. 7 p.

11. *Липаткин В.И., Лобова Е.О.* Алгоритм обнаружения широкополосного сигнала в условиях его дисперсионных искажений при одновременной оценке множества параметров // Электросвязь. 2022. № 7. С. 23-29.

12. *Poborchaya N.E., Pestryakov A.V., Lobova E.O.* Application of Approximation Constructions with a Small Number of Parameters for the Estimation of a Rayleigh Fading Multipath Channel with Doppler Spectrum Spreading // Sensors 2022, 22, 3488.

13. *Poborchaya N.E., Lobova E.O.* Analysis of the Use of the Kalman Filter for Signal Detection in a Direct Conversion Receiver in MIMO // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2022. P. 1-5.

14. *Шавин М.Ю.* Численные методы нелинейной фильтрации для оценки состояния квадрокоптера с поворотными роторами // Труды МФТИ. 2019. Т. 11, № 3. С. 86-95.

15. *Иванов Д.В.* Методы и математические модели исследования распространения сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 266 с.

16. *Лобов Е.М., Лобова Е.О., Кандауров Н.А.* Оптимальный следящий компенсатор дисперсионных искажений широкополосных сигналов // Электросвязь. 2018. №5. С. 34-38.

17. *Куликова М. В., Куликов Г.Ю.* Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 4. С. 64-98.

COMPARISON OF THE QUALITY OF OPTIMAL FILTERING OF THE SLOPE OF THE DISPERSION CHARACTERISTIC BY THE STRATONOVICH FILTER AND THE UNSCENTED KALMAN FILTER

Vladimir O. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, varlamov@srd.mtuci.ru

Nikolay A. Kandaurov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, kandaurov@srd.mtuci.ru

Elizabeth O. Lobova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, lizabeth2@mail.ru

Evgeny M. Lobov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, lobov@srd.mtuci.ru

The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-06055

Abstract

The article deals with the reception and transmission of broadband signals through the ionospheric channel. An increase in the width of the spectrum of transmitted signals leads to a significant effect of the frequency dispersion of the Earth's ionosphere on the quality of information reception. Estimation of dispersion distortions of broadband signals and compensation of their influence in the article is carried out by methods of optimal filtering. Two algorithms for nonlinear optimal filtering of the slope of the dispersion characteristic of the ionospheric channel are compared: using the Stratonovich filter and using the sigma-point Kalman filter. The article presents general analytical expressions for calculating the estimate of the slope of the dispersion characteristic for both algorithms: Stratonovich filtering and filtering using the unscented Kalman filter. In addition, the results of simulation modeling are presented, the purpose of which was to compare the two above-mentioned filtering algorithms within the framework of the task. Three cases of the dependence of the slope of the DC on time are studied: a Markov damped process, a constant process, and a process with random increments for phase-shift keyed signals with different spectral widths under the assumption of large signal-to-noise ratios. It is shown that for signals with a spectral width from 500 kHz to 1 MHz, the unscented Kalman filter adjusts on average 2 times faster, however, the standard deviation of the estimate of the slope of the dispersion characteristic from the true value is up to 1.5 times larger compared to the Stratonovich filter. The duration of the filter adjustment decreases with a decrease in the width of the signal spectrum from 1 MHz to 250 kHz. In the 250 kHz band, both considered filters have approximately the same tuning speed and filtering quality.

Keywords: frequency dispersion of the ionospheric channel, nonlinear optimal filtering, point estimation, broadband signal, Stratonovich filtering, unscented Kalman filter.

References

1. M.B. Jorgenson, R.W. Johnson, and R.W. Nelson (2013), "An Extension of Wideband HF Capabilities", *IEEE Military Communications Conference*, pp. 1202-1206.
2. E.M. Lobov, E.O. Smerdova (2016), "The quality of detection of broadband signals in the conditions of dispersion distortions in the ionospheric radio link," *Telecommunications and telecommunication technologies*. Vol. 3, no. 2, pp. 61-62.
3. E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin (2021), "Investigation of the influence of dispersion distortions of wideband signals on the quality of their delay and frequency shift estimation," *Synchroinfo journal*. Vol. 7, no. 1, pp. 11-16.
4. V.I. Lipatkin, and E.O. Lobova (2020), "Broadband Noise-like Signal Parameters Joint Estimation Quality with Dispersion Distortions in the Ionospheric Channel", *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 6.
5. E.M. Lobov, V.O. Varlamov, K.Y. Sokolov (2020), "Methods for increasing the computational efficiency of the algorithm for calculating the compensator for non-uniformity of the frequency response of analog filters in a hybrid filter bank," *2020 Systems of Signal generating and processing in the field of board communications*. P. 4.
6. D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, V.V. Ovchinnikov (2018), "Adaptive detection of a broadband signal when probing a multidimensional HF communication channel," *Proceedings of XII All-Russian Conference "Radiolocation and radio communication,"* Moscow: Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences (RAS), pp. 196-200.
7. E.M. Lobov, I.S. Kosilov, N.A. Kandaurov, B.A. Elsuikov (2015), "The quality of the maximum plausible estimate of the slope of the dispersion characteristic of the ionospheric channel by broadband sounding signals," *Systems of synchronization, signal generation and processing*. Vol. 6, no. 4, pp. 162-164.
8. V.I. Lipatkin, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov (2022), "Computationally Efficient Implementation of Joint Detection and Parameters Estimation of Signals with Dispersive Distortions on a GPU," *Sensors*, 22, 3105.
9. S.S. Adjemov, E.M. Lobov, E.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin (2021), "Algorithms of estimating and compensating the dispersion distortions of wideband signals in the HF channel," *H&ES Reserch*. Vol. 13, no. 5, pp. 57-74.
10. V.I. Lipatkin, E.M. Lobov, E.O. Lobova, N.A. Kandaurov (2021), "Cramer-Rao Bounds for Wideband Signal Parameters Joint Estimation in Ionospheric Frequency Dispersion Distortion Conditions," *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG*. 7 p.
11. V.I. Lipatkin, V.O. Lobova (2022), "An algorithm for detecting a broadband signal under the conditions of its dispersive noise when estimating the estimation parameters," *Telecommunications*. No. 7, pp. 23-29.
12. N.E. Poborchaya, A.V. Pestryakov, E.O. Lobova (2022), "Application of Approximation Constructions with a Small Number of Parameters for the Estimation of a Rayleigh Fading Multipath Channel with Doppler Spectrum Spreading," *Sensors*, 22, 3488.
13. N.E. Poborchaya, and E.O. Lobova (2022), "Analysis of the Use of the Kalman Filter for Signal Detection in a Direct Conversion Receiver in MIMO", *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-5.
14. M.Y. Shavin (2019), "Numerical methods of nonlinear filtering for the state estimation of a tilt rotor quadrotor", *WORKS OF MIPT*, vol. 11, No. 3. pp. 86-95.
15. D.V. Ivanov (2006), "Methods and mathematical models for studying the propagation of complex decimeter signals and correcting their dispersion distortions", Abstract of Ph.D. dissertation, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia.
16. E.M. Lobov, E.O. Lobova, and N.A. Kandaurov (2018), "Optimal tracking compensator for dispersion distortions of broadband signals", *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 34-38.
17. M.V. Kulikova, and G.Y. Kulikov (2016), "Numerical methods for nonlinear filtering of signals and measurements", *Computational Technologies*, vol. 21, no. 4., pp. 64-98.

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ИНФОРМАЦИИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ ВБЛИЗИ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Юденков Алексей Витальевич,
ВО "СГУС", г. Смоленск, Россия, aleks-ydenkov@mail.ru

Володченков Александр Михайлович,
Смоленский филиал РЭУ им. Г.В.Плеханова, г. Смоленск, Россия;
ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, г. Смоленск, Россия,
alexmw2012@yandex.ru

Римская Лилия Павловна,
Смоленский филиал РЭУ им. Г.В.Плеханова, г. Смоленск, Россия,
lilirimska@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-20-25

Manuscript received 20 November 2022;
Accepted 12 January 2023

Ключевые слова: фазовый переход, гетерофазная флуктуация, марковский процесс, процесс гибели и размножения

Теория Ландау фазовых переходов и теория гетерофазных флуктуаций Френкеля благодаря своей простоте и эффективности приобрели статус универсальных теорий, имеющих многочисленные приложения в различных отраслях науки и техники. Одним из важных научных направлений развития теории является исследование изменения информации в сложных системах. На сегодняшний день актуальной задачей является разработка многоуровневых математических моделей динамики перехода макроскопической системы в новое фазовое состояние, основанных на анализе изменения информации Шеннона. В работе предлагается дискретная модель фазового перехода на микроскопическом уровне. От моделей, используемых в теории Ландау и Френкеля, дискретная модель фазового перехода отличается меньшим масштабом, что приводит к большей зависимости от случайных факторов. Модель основана на теории марковских процессов и принципе максимума информации или информационной энтропии. Основным математическим аппаратом являются уравнения Колмогорова. Для наглядности используются графы Колмогорова. Результаты работы. Построена стохастическая модель фазового перехода на микроуровне. Модель остается адекватной, как вблизи точки фазового перехода, так и вдали от него. Дана оценка интенсивности эволюции энтропии системы. Получена динамика смены фаз при переходах первого и второго рода. Получены условия для фазового равновесия при фазовых переходах первого и второго рода. Дана стохастическая интерпретация явления гистерезиса на микроскопическом уровне. Полученные результаты находятся в соответствии с положениями теории Ландау и Френкеля. Результаты работы имеют перспективы применения в прогнозировании кризисов сложных систем по динамике изменения информации.

Информация об авторе:

Юденков Алексей Витальевич, ФГБОУ ВО "СГУС", заведующий кафедрой менеджмента и естественно-научных дисциплин, доктор физико-математических наук, профессор, г. Смоленск, Россия

Володченков Александр Михайлович, Смоленский филиал РЭУ им. Г.В.Плеханова, заведующий кафедрой естественнонаучных и гуманитарных дисциплин, г. Смоленск, Россия; ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, доцент кафедры механизации, к.ф.-м.н., доцент, г. Смоленск, Россия

Римская Лилия Павловна, Смоленский филиал РЭУ им. Г.В.Плеханова, доцент кафедры менеджмента и таможенного дела, к.ф.-м.н., доцент, г. Смоленск, Россия

Для цитирования:

Юденков А.В., Володченков А.М., Римская Л.П. Дискретная модель эволюции информации сложной системы вблизи точки фазового перехода // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 20-25.

For citation:

Yudenkov A.V., Volodchenkov A.M., Rimskaia L.P. (2023) Discrete model of information evolution of a complex system near a phase transition point. T-Comm, vol. 17, no.1, pp. 20-25. (in Russian)

Введение

Теория Ландау фазовых переходов первого и второго родов, дополненная теорией гетерофазных флуктуаций Френкеля, является эффективным инструментом для исследования термодинамических систем при различных внутренних и внешних условиях ([2], [3], [11]). Благодаря связи между информационной энтропией и энтропией, как термодинамической функцией, появилась возможность использовать математические модели Ландау в теории сложных систем, то есть систем, зависящих от многих факторов. При этом принцип минимума термодинамического потенциала заменяется на принцип максимума информации. Это позволяет заменить достаточно специфическую для термодинамики функцию (термодинамический потенциал) на более общее понятие (энтропию) ([5], [7]).

Особенностью сложных систем является то, что для их описания невозможно подобрать одну универсальную математическую модель [6]. В большинстве случаев используется ряд моделей, которые описывают систему на определенном уровне. Например, макроскопический уровень описывает систему в целом. Микроскопическая модель характеризует динамику составляющих ее частей. Также отдельно рассматривается процесс смены макроскопических состояний. Такие модели называются моделями мезодинамики.

Классическая теория Ландау относится к макроскопическим моделям. Поэтому в ней практически не учитывается случайный фактор.

Теория Френкеля сочетает как черты макроскопических моделей, так и микроскопических. С одной стороны системы в состоянии близком к фазовому переходу рассматривались на уровне отдельных молекул относительно «старой фазы». С другой стороны, в качестве молекул «новой фазы» выступают флуктуационные зародыши, размер которых можно оценить от 10^3 до 10^5 молекул. Такие объекты достаточно велики, чтобы использовать для оценки динамики эволюции флуктуационного зародыша средние значения, что приводит к детерминированной модели. Такой подход критиковался, в том числе и Л.Д. Ландау, который указывал, что система с такими «сверх» молекулами становится слишком неоднородной. Хорошее согласование теории гетерофазных флуктуаций с опытными данными оправдывает такой подход.

Цель данной работы – предложить стохастическую модель фазового перехода на микроуровне, которая эффективно описывала бы фазовые изменения сложной системы на основе изменения энтропии Шеннона. Для этого используется теория марковских процессов аналогичных процессу гибели-размножения.

Обзор результатов

Классическая теория Ландау фазовых переходов базируется на следующих положениях [4].

1. Устойчивое состояние термодинамической системы соответствует минимуму термодинамического потенциала $\Phi = U + PV - TS$.

2. Термодинамический потенциал является аналитической функцией, которую можно разложить в ряд Тейлора.

3. Термодинамический потенциал должен соответствовать симметричному лагранжиану.

В этом случае термодинамический потенциал вблизи точки фазового перехода T_c можно разложить в ряд по параметру p .

$$\Phi(P, T, p) = \Phi_0 + A(P, T)p^2 + B(P, T)p^4 \quad (1)$$

Здесь $B(P, T) > 0$. Коэффициент A отвечает за фазовый переход из фазы A в фазу B . Обычно полагают, что

$$A(P, T) = a(P)(T - T_c). \quad (2)$$

Таким образом, при $T > T_c$ коэффициент A больше нуля. При $T < T_c$ A меньше нуля.

Отсюда при $A > 0$ существует одна точка глобального минимума в точке $p=0$. Стабильна фаза A .

При $A < 0$ функция $\Phi(P, T, p)$ имеет три критические точки.

В точке $p=0$ точка максимума. В точках $p_{12} = \pm \sqrt{-\frac{A}{2B}}$ – минимумы. Это означает, что происходит фазовый переход от состояния A к образцу в состоянии B . Переход осуществляется равномерно без задержки.

Для фазового перехода первого рода применима та же методика, что и для перехода второго рода. В данном случае модель имеет следующий вид:

$$\Phi(P, T, p) = \Phi_0 + A(P, T)p^2 + B(P, T)p^4 + C(P, T)p^6. \quad (3)$$

В этом случае при $A > 0$ существует один глобальный минимум. Стабильна фаза A .

При $A < 0$ и $-B + \sqrt{B^2 - AC} > 0$ система имеет один локальный минимум при $p=0$ и два симметричных глобальных минимума $p = \pm \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{3C}}$. Локальный минимум соответствует метастабильному состоянию A . Глобальные минимумы соответствуют устойчивому состоянию новой фазы.

Таким образом, при фазовом переходе 1-го рода смена фаз происходит с некоторым запаздыванием, что порождает явление гистерезиса, являющегося характерным признаком перехода 1-го рода.

Теория Ландау относится к макроскопическим теориям. Она теряет свою эффективность непосредственно вблизи точки фазового перехода.

Теория гетерофазных флуктуаций Френкеля. Согласно этой теории в результате флуктуаций температуры в системе, находящейся в основной фазе A будут возникать зародыши другой фазы B .

Распределение зародышей по размерам (или по числу элементов в зародыше) будет определяться формулой:

$$M_n = M \exp\left(-\frac{\Delta F_n}{T}\right).$$

Здесь M – полное число частиц всех возможных размеров в системе

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} n M_n \approx M_1.$$

T – параметр, отвечающий за фазовый переход.

При приближении к точке фазового перехода размер зародышей будет возрастать. Пусть N – общее число элементов

системы, N_A – число элементов системы в фазе А, N_B – число элементов в фазе В. Введем в рассмотрение величину

$$L = \frac{N_A}{N - N_A}.$$

Если величина $L \geq 1$, то считается, что произошёл фазовый переход второго рода.

В случае перехода первого рода между фазами существует граница, обладающая некоторой энергией.

Положим, что характерный размер зародыша r , тогда изменение энергии системы в результате его образования можно оценить следующим образом:

$$\Delta E = \sigma r^2 - \rho r^3(\varphi_B - \varphi_A).$$

Здесь σ , ρ – положительные коэффициенты; φ_B и φ_A – соответствующие удельные потенциалы.

Минимум энергии будет в точке

$$r_c = \frac{2\sigma}{\rho(\varphi_B - \varphi_A)}.$$

Таким образом, наличие границы между фазами сдвигает фазовый переход сторону увеличения размера зародыша новой фазы. Смена фаз наступит в том случае, когда большинство зародышей будет больше критического размера $\sim r_c^3$.

Принцип максимума информации. Для сложной системы, зависящей от целого ряда факторов некоторые из которых могут быть трудно формализуемые, использовать без изменения понятия термодинамики затруднительно. Поэтому в качестве основной функции сложной системы предлагается использовать информационную энтропию [5]

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i. \quad (4)$$

Информационная энтропия непосредственно связана с информацией Шеннона через коэффициент Больцмана k .

Согласно принципу максимума информации устойчивому положению сложной системы соответствует максимум информации [4]. Этот принцип (второе начало синергетики) сочетается с термодинамическим принципом минимума потенциала Φ .

Одним из основных положений теории сложных систем это то, что переход в новое состояние осуществляется под воздействием одного параметра порядка (ξ).

Микроскопическая модель кризиса сложной системы основана на процессе броуновского движения. Переход к макроскопической модели происходит с помощью уравнения Ланжевена:

$$\dot{q} = K(q) + F(t). \quad (5)$$

Здесь q – выступает в роли некоторой скорости. $F(t)$ – флуктуирующая сила, которая удовлетворяет следующим условиям:

$$\langle F(t) \rangle = 0, \\ \langle F(t)F(t') \rangle = Q\delta(t - t').$$

$K(q)$ – систематические силы.

Для броуновского движения $K(q) = -\gamma q$.

Для того чтобы использовать статические решения уравнения (5) используется принцип детального равновесия. Согласно этому принципу система находится в равновесии, если скорости перехода системы из состояния S_1 в состояние S_2 и из состояния S_2 в состояние S_1 равны.

Следуя теории Ландау, для параметра порядка вблизи фазового состояния фазового перехода можно записать следующее уравнение:

$$\dot{\xi} = 2A\xi + 4B\xi^3 + F(t).$$

Такой вид правой части соответствует фазовый переход второго рода.

Для фазового перехода первого рода уравнение Ланжевена имеет вид:

$$\dot{\xi} = 2A\xi + 4B\xi^3 + 6C\xi^5 + F(t).$$

В работе [5] показано, что теория Ландау неравновесных фазовых переходов следует, как частный случай, из принципа максимума информации теории сложных систем.

Аналог теории гетерофазных флуктуаций в теории сложных систем, насколько известно авторам работы, пока не представлен в научной литературе.

Модель фазового перехода на микроуровне

Предложим математическую модель фазового перехода сложной системы на микроуровне, основанную на принципе максимума информации.

Простейшая модель образования новой фазы для системы, состоящей из однородных элементов, может быть представлена следующим образом.

В начальный момент q элементов объединяются в один центр:

$$qM_1 \leftrightarrow M_q.$$

После этого идут два процесса. Один заключается в том, что к зародышу присоединяются новые элементы. При этом происходит рост зародыша. Второй процесс заключается в том, что элементы покидают зародыш. Схематично эволюцию центра новой фазы можно представить следующим образом:

$$M_q + M_1 \leftrightarrow M_{q+1}, \\ \dots \\ M_n + M_1 \leftrightarrow M_{n+1} . \\ \dots$$

Для формализации изложенного процесса используем модель фазового пространства аналогичной модели дискретной фазового пространства, представленной в работах [9] и [10]. Основным отличием данной модели является то, что модель дискретного фазового пространства относится к одной частице, которая могла быть в одной из доступных фазовых ячеек. В данном случае различные частицы объединяются в один объект, увеличивая число степеней свободы, то есть фазовый объем. Для того чтобы модель была аддитивной следует перейти от фазового объема к логарифму фазового объема, энтропии.

Это вполне согласуется как со вторым началом термодинамики. Так и с принципом максимума энтропии.

Введем следующие обозначения. S_1 – энтропия системы, состоящей из одной частицы, S_2 – энтропия системы двух частиц... S_n – энтропия системы, состоящей из n частиц. Будем полагать, что рост новой фазы происходит согласно простейшему потоку событий. Тогда эволюция зародыша новой фазы представляет собой марковский процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. Интенсивность перехода между состояниями можно оценить на примере идеального газа следующим образом [8]:

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \sim \frac{kT}{h} \sim 10^{13} c^{-1}. \quad (6)$$

Здесь h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана.

В общем случае интенсивность переходов будет зависеть не только от температуры, но и от внутреннего строения элементов фазы. То есть

$$\lambda_i \sim \frac{A_i kT}{h}. \quad (7)$$

Здесь A_i – определенный коэффициент.

Пусть, условно, фаза 1 соответствует «холодному» состоянию системы, фаза 2 – «нагретому».

Результаты. Рассмотрим фазовый переход второго рода. Напомним, что в этом случае между фазами нет четкой границы. Фазовое равновесие между фазами 1 и 2 представлено графом Колмогорова (см. рис. 1).

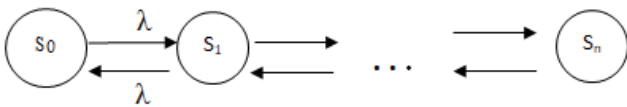


Рис. 1. Граф фазового равновесия при фазовом переходе второго рода

Исходя из формул (6) и (7) при фазовом равновесии $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_c$. При этом

$$\lambda_c \sim \frac{AkT_c}{h}.$$

Здесь T_c – температура фазового равновесия.

В стационарном состоянии математическое ожидание числа элементов фазы 1 равно $E_1(N) = E_2(N) = n/2$.

Пусть в начальный момент основной является фаза 2 и имеет температуру $T_2 > T_c$.

В этом случае фазовый переход будет проходить следующим образом. Интенсивность перехода из фазы 1 в фазу 2 будет проходить с интенсивностью $\lambda_{12} \sim T_c$. Интенсивность перехода из фазы 2 в фазу 1 (λ_{21}) пропорциональна температуре T_2 . То есть выполняется условие: $\lambda_{12} < \lambda_{21}$. Соответствующий граф Колмогорова представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Граф изменения энтропии системы при температуре выше температуры фазового равновесия

Граф на рисунке 2 формально совпадает с известным графом одноканальной СМО с ограниченной очередью. Это еще раз подчеркивает достаточно общий характер предлагаемой модели.

Такая задача достаточно известна в теории случайных процессов (смотри [1] с.252).

Соответствующие характеристики системы в стационарном режиме имеют вид:

$$E(N) = n \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} < 0.5n. \quad (8)$$

$$D(N) = n \frac{\lambda_{12}\lambda_{21}}{(\lambda_{12} + \lambda_{21})^2}. \quad (9)$$

Относительная доля фазы 1 равна

$$L = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} < 1. \quad (10)$$

Сама динамика изменения энтропии будет определяться системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dp_0}{dt} &= \lambda_{21}p_1 - \lambda_{12}p_0, \\ \dots, \\ \frac{dp_n}{dt} &= \lambda_{21}p_n - \lambda_{12}p_{n-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

С дополнительным условием нормировки:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

В случае, если $T_2 < T_c$, то формулы (8) – (11) остаются в силе. Однако $E(N) > 0.5n$, $L > 1$.

Дискретная модель фазового перехода второго рода является симметричной.

Рассмотрим фазовый переход первого рода. Фазовый переход первого рода характеризуется тем, что фазы разделены границей. В этом случае элемент прежде, чем перейти из внутренней части системы на границу, потом из граничного слоя перейти в другую фазу. Используя графы Колмогорова, можно формализовать процесс перехода следующим образом (см. рис. 3). Здесь состояние S соответствует нахождению элемента в пограничном слое.

Здесь выполняется условие:

$$\lambda_{12} + \lambda_s = \lambda_1.$$

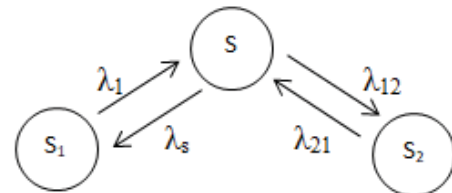


Рис. 3. Переход отдельного элемента системы в другую фазу при наличии границы

Наличие границы нарушает симметрию фазового перехода. При температуре T_c , исходя из формул (10), получим, что доля новой фазы определяется по формуле.

$$L = \frac{\lambda_{21} - \lambda_1}{\lambda_{21}} < 1.$$

Поэтому температура фазового перехода T_0 будет определяться по формуле:

$$T_0 = \frac{\lambda_{21} - \lambda_1}{\lambda_{21}} T_c.$$

Отсюда температурный гистерезис равен:

$$\Delta T = \frac{\lambda_1}{\lambda_{21}} T_c.$$

В случае обратного фазового перехода рост фазы 2 граничный слой будет уменьшать интенсивность λ_{21} . Поэтому будет наблюдаться обратный температурный гистерезис.

Фазовый переход первого рода из-за наличия границы не является симметричным в отличие от перехода второго рода.

Заключение

Дискретная модель эволюции информации (энтропии) позволяет использовать для исследования фазовых переходов хорошо развитую теорию марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Представленная модель является микроскопической моделью. Она работает вплоть до квазиклассического уровня. На таком уровне можно рассмотреть переход в новую фазу отдельного элемента, динамику роста зародыша новой фазы. Определить границы «перегрева» системы при переходе первого рода.

Это позволяет предположить, что предложенная дискретная микроскопическая модель будет полезна при исследовании не только фазовых переходов в термодинамике, но и при исследовании кризисов сложных систем.

Литература

1. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. 5-е издание, стереотипное. М.: Юстиция, 2018. 448 с. ISBN 978-5-4365-1903-6. EDN ZEYDUN.
2. *Головинский П. А.* Флуктуации предплавления // Химия, физика и механика материалов. 2020, № 2(25). С. 129-146. EDN SKNMBE.
3. *Зломанов В.П., Казин П.Е., Яценко А.В.* Вещество и его превращения: основные понятия // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24. № 2. С. 211-219. DOI 10.17308/kcmf.2022.24/9261. EDN AHVKZZ.
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая механика т.5. Статистическая механика. М.: Наука, 1989. 626 с.
5. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
6. *Пугачев В.С., Сеницын И.Н.* Теория стохастических систем: учеб. пособие. М.: Логос, 2004. 999 с. ISBN 5-94010-199-2. EDN QJMUOD.
7. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным явлениям. М.: Мир, 1991. 240 с.
8. *Чернавский, Д.С.* Информация, самоорганизация, мышление // Сложные системы. 2019. № 2(31). С. 23-56. EDN WNYWWM.
9. *Юденков А.В., Володченков А.М., Римская Л.П.* Дискретная модель эволюции фазового пространства дробно размерных микросистем // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 4. С. 14-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-4-14-20. EDN YTUJDH.
10. *Yudakov A.V., Volodchenkov A.M., Rimskaya L.P.* (2021) Transition and evolution of information at the microscopic level // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2021. Vol. 15. № 5. P. 62-66. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-5-62-66. EDN HCHHOX.
11. *Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N.* Structural phase transition in surface layer of metals // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2019. № 1(93). P. 50-60. DOI 10.31489/2019Ph1/50-60. EDN DQVKKG.

организаторы:

RUSSIA SECTION TEM/GRS/ITSS JOINT CHAPTER
IRIS ASSOCIATION (INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS, VIENNA, AUSTRIA)

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «2023 International Conference «Engineering Management of Communication and Technology» (EMCTECH)

23 – 25 октября 2023
г. Вена, Австрия

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore

Materials are available in English

<http://media-publisher.eu/conference-emctech/call-for-papers/>

DISCRETE MODEL OF INFORMATION EVOLUTION OF A COMPLEX SYSTEM NEAR A PHASE TRANSITION POINT

Aleksey V. Yudenkov, FSSFEE HE "SSUS", Smolensk, Russia, aleks-yudenkov@mail.ru

Aleksandr M. Volodchenkov, Smolensk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Smolensk, Russia;

FSBEI HE Smolensk SAA, Smolensk, Russia, alexmw2012@yandex.ru

Liliya P. Rimskaya, Smolensk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Smolensk, Russia, lilirimska@yandex.ru

Abstract

Landau's theory of phase transitions and Frenkel's theory of heterophase fluctuations, due to their simplicity and efficiency, have acquired the status of universal theories that have numerous applications in various branches of science and technology. One of the important scientific directions in the development of the theory is the study of changes in information in complex systems. To date, an urgent task is the development of multilevel mathematical models of the dynamics of the transition of a macroscopic system to a new phase state, based on the analysis of changes in Shannon information. The paper proposes a discrete model of the phase transition at the microscopic level. The discrete phase transition model differs from the models used in the Landau and Frenkel theory by a smaller scale, which leads to a greater dependence on random factors. The model is based on the theory of Markov processes and the principle of maximum information or information entropy. The main mathematical apparatus is the Kolmogorov equations. For clarity, Kolmogorov graphs are used. Work results. A stochastic model of the phase transition at the microlevel is constructed. The model remains adequate both near the phase transition point and far from it. An estimate of the intensity of the evolution of the entropy of the system is given. The dynamics of phase change during transitions of the first and second order is obtained. Conditions for phase equilibrium are obtained for phase transitions of the first and second kind. A stochastic interpretation of the phenomenon of hysteresis at the microscopic level is given. The results obtained are in accordance with the principles of Landau and Frenkel's theory. The results of the work have prospects for application in forecasting crises of complex systems based on the dynamics of information changes.

Keywords: *phase transition, heterophase fluctuation, Markov process, death and reproduction process.*

References

1. E. S. Venttsel, L. A. Ovcharov (2018) Theory of random processes and its engineering applications. 5th edition, stereotypical. Moscow: Justice. 448 p. ISBN 978-5-4365-1903-6.
2. P. A. Golovinsky (2020) Premelting fluctuations. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. No. 2(25). P. 129-146.
3. V. P. Zlomanov, P. E. Kazin, A. V. Yatsenko (2022) Substance and its transformations: basic concepts. *Condensed media and interphase boundaries*. Vol. 24. No. 2. P. 211-219. DOI 10.17308/kcmf.2022.24/9261.
4. L.D. Landau, E.M. Lifshitz (1989) Theoretical mechanics v.5. Statistical mechanics. Moscow: Nauka. 626 p.
5. G. Nicolis, I. Prigogine (1979) Self-organization in non-equilibrium systems: From dissipative structures to orderliness through fluctuations. Moscow: Mir. 512 p.
6. V. S. Pugachev, I. N. Sinitsyn; V. S. Pugachev, I. N. Sinitsyn (2004) Theory of stochastic systems: textbook. allowance. Moscow: Logos, 999 p. ISBN 5-94010-199-2.
7. G. Haken (1991) Information and self-organization. Macroscopic approach to complex phenomena. Moscow: Mir. 240 p.
8. D. S. Chernavsky (2019) Information, self-organization, thinking. *Complex systems*. No. 2 (31). P. 23-56.
9. A. V. Yudenkov, A. M. Volodchenkov, L. P. Rimskaya (2022) Discrete model of phase space evolution of fractional microsystems. *T-Comm*. Vol. 16. No. 4. P. 14-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-4-14-20.
10. A. V. Yudenkov, A. M. Volodchenkov, L. P. Rimskaya (2021) Transition and evolution of information at the microscopic level. *T-Comm*. Vol. 15. No. 5. P. 62-66. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-5-62-66.
11. V. M. Yurov, S. A. Guchenko, V. Ch. Laurinas, O. N. Zavatskaya (2019) Structural phase transition in surface layer of metals. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. No 1(93). P. 50-60. DOI 10.31489/2019PhI/50-60.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАСЧЕТУ МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПОЖАРОВ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-26-32

Manuscript received 10 December 2022;
Accepted 14 January 2023

Загуменнова Марина Викторовна,
Всероссийский научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России,
Балашиха, Россия, otdel-16@vniipo.ru

Ключевые слова: материальный ущерб,
транспортное средство, алгоритм, органы
государственного пожарного надзора, программное
средство

Транспортная безопасность занимает важное место в системе устойчивого функционирования умного города. Наземный электрический транспорт – один из главных перевозчиков пассажиров внутри городов. Постоянное развитие технологий в области транспорта и информации приводит к необходимости уделять больше внимания существующим в данной отрасли проблемам. В статье исследованы вопросы информационного обеспечения должностных лиц органов государственного пожарного надзора МЧС России на основе поддержки принятия решений по расчету материального ущерба от пожаров на примере расчета ущерба в результате уничтожения транспортных средств. Рассмотрена математическая модель расчета материального ущерба от пожара на транспортном средстве в соответствии с Методическими рекомендациями об организации расчета материального ущерба от пожаров МЧС России. Представлены алгоритм и программное средство по расчету материального ущерба, нанесенного пожаром транспортным средствам. Проведены расчеты материального ущерба в результате уничтожения (повреждения) пожаром транспортного средства с использованием программного средства и сделаны выводы об адекватности и корректности применяемых методов и алгоритмов для поддержки принятия решений должностными лицами органов государственного пожарного надзора МЧС России.

Для цитирования:

Загуменнова М.В. Модели и алгоритмы поддержки принятия решений по расчету материального ущерба от пожаров на транспортных средствах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 26-32.

For citation:

Zagumenнова M.V. (2023). Models and algorithms to support decision-making on the calculation of material damage from fire on vehicles. T-Comm, vol. 17, no.1, pp. 26-32. (in Russian)

Введение

Развитие цифровых технологий требует адекватного изменения и преобразования механизмов управления с использованием современных информационных технологий. Формирование и совершенствование информационного обеспечения управления объединено с построением системы обработки данных и сведений и формированием интегрированных автоматизированных систем. Современные технологии сбора и обработки управленческой информации основываются на автоматизации процессов управления [1].

Автоматизация представляет собой способы применения технических средств, экономических и математических методов в системе управления, снижающих участие человека в процессах получения, преобразования, передачи информации и уменьшающих трудоемкость выполняемых операций [2]. Разработка методов и алгоритмов для поддержки принятия управленческих решений является предметом исследования многих направлений науки, в том числе в сфере пожарной безопасности.

МЧС России является участником реализации федерального проекта «Цифровое государственное управление»¹ и национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»², направленных на внедрение информационных систем не только для предоставления государственных услуг в электронной форме, но и для обработки и мониторинга данных. Также, в рамках цифровизации МЧС России, запланировано информационное обеспечение мониторинга пожарной безопасности объектов защиты для совершенствования механизмов применения риск-ориентированного подхода.

Мониторинг и анализ собранных данных может повысить обоснованность стратегических решений в области повышения эффективности профилактических мер, проводимых государственным пожарным надзором (далее - ГПН) [3]. Кроме того, согласно утвержденным основам государственной политики в области пожарной безопасности до 2030 г.³, уровень научно-технического и информационного обеспечения пожарной безопасности является одним из основных факторов, влияющих на состояние пожарной безопасности и оценку рисков.

В соответствии с принятым в июле 2021 года федеральным законом № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации»⁴ (далее – 248-ФЗ) критерии риска должны учитывать тяжесть причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям и вероятность наступления негативных событий, которые могут повлечь причинение вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям. В ФЗ-248 определено, что «при определении критериев риска оценка вероятности наступления негативных событий, которые могут повлечь причинение вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям, проводится с учетом предшествующих данных о фактическом причинении

вреда (ущерба) вследствие наступления событий, вызванных определенными источниками и причинами риска причинения вреда (ущерба), по различным видам объектов контроля с выделением видов объектов контроля, характеризующихся схожей или различной частотой случаев фактического причинения вреда (ущерба)».

В некоторых областях, таких как пожарная безопасность, традиционные подходы количественного определения риска, могут быть ограничены недостатком знаний. Неполная информация о пожарах и их последствиях, подразумевает, что числовая мера рисков не может отражать в полной мере приемлемый (допустимый) уровень риска.

Ключевая проблема действующей нормативно-технической базы в области пожарной безопасности и оценки рисков заключается в том, что приемлемые уровни рисков не являются научно обоснованными. В течение последних десятилетий инженерные дисциплины поддерживали принятие решений по управлению рисками посредством проведения оценок на основе количественных подходов. Однако на применение таких подходов влияет отсутствие инструментов оценки. Эта и другие ключевые проблемы, связанные с количественным определением риска подчеркиваются практиками и исследователями.

Международные организации различного уровня решают задачи адекватной оценки текущих параметров пожарной опасности [4]. Основной проблемой количественного определения риска является отсутствие знаний и способности точно оценивать последствия на основании имеющихся статистических данных.

В ряде исследований показано, что доля пожаров с зарегистрированным материальным ущербом в Российской Федерации составляет порядка 15-20% от общего количества пожаров по различным группам объектов защиты [5-7]. По существующим правилам учета пожаров в Российской Федерации⁵ данные об ущербе от пожара носят справочный характер и регистрируются только на основании документов, представляемых пострадавшими:

- справки об ущербе от пожара, выданной организацией на основании документов бухгалтерской отчетности организации, на объектах которой произошел пожар;
- справки об ущербе или страховом возмещении от пожара, выданной страховой организацией;
- выписок из решений судебных органов;
- документов собственников, подтверждающих стоимость уничтоженного и (или) поврежденного личного имущества.

Такой подход, в настоящее время, не дает полноценной информации о материальных последствиях пожаров в Российской Федерации. Основываясь на предшествующих статистических данных, определить критерий риска по материальной составляющей, который должен учитывать тяжесть причинения вреда (ущерба) охраняемым законом крайне

¹ "Паспорт федерального проекта "Цифровое государственное управление" (утв. президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности, протокол от 28.05.2019 N 9) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_328938/

² Паспорт национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации" (утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам 24 декабря 2018 г. N 16) <https://base.garant.ru/72190282/>

³ Указ Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2 "Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года" <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71749394/>

⁴ Федеральный закон от 31 июля 2020 г. N 248-ФЗ "О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации" <http://ivo.garant.ru/proxy/share?data=q4Og0aLnpN5Pvp>

⁵ Приказ МЧС России от 04.10.2022 № 954 «Об утверждении Регламента работы в информационной системе «Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России»

затруднительно. Проблема учета пожаров и анализа их последствий является проблемой мирового уровня. Анализ зарубежных практик, обеспечивающих высокий уровень достоверности и точности статистических данных показал, что существует необходимость в альтернативных источниках информации, дополняющих официальную статистику и применении расчетных методов определения ущерба [8]. Проведение адекватной и полной оценки ущерба от пожаров, приобретает все большую актуальность и остроту.

Модели и методы

С целью повышения обоснованности принимаемых решений в области пожарной безопасности, за счёт поддержки принятия решений по расчету материального ущерба от пожаров, в МЧС России разработаны Методические рекомендации об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов ГПН (далее – Методические рекомендации) [9], утвержденных приказом МЧС России⁶.

Методические рекомендации регламентируют определение ущерба только в рамках статистического учета и расчетный ущерб не предназначен для совершения юридически значимых действий, но в дальнейшем, полученные результаты, могут стать базой для аналитических исследований. Математические модели, представленные в Методических рекомендациях, разработаны для широкого круга объектов защиты, в том числе: здания (сооружения); транспортные средства: сельскохозяйственные посевы и лесные насаждения; объекты на открытой территории; животные.

Для каждого вида объекта защиты предусмотрен расчет по двум методам. Расчетно-аналитический метод, основанный на расчете ущерба, приходящегося на один квадратный метр (далее – 1 м²) площади объекта защиты. Который, в свою очередь, основан на расчете стоимости восстановления (строительства) 1 м² объекта защиты. Для расчета ущерба по расчетно-аналитическому методу используются сформированные электронные базы данных расчетных показателей такие как: восстановительная стоимость 1 м² объекта строительства, стоимость транспортных средств, стоимость 1 м² сельскохозяйственных посевов и т.п. Электронные базы данных сформированы на основании официальных данных Росстата, Минстроя России и на основе проведенного конъюнктурного анализа. В случае отсутствия в базах данных необходимых параметров, применяется второй метод – прямой расчетный, основанный на документарном подходе. Расчет ущерба по второму методу основывается на расчете необходимых параметров исходя из данных, предоставленных собственником.

В качестве примера в статье приведены математические модели расчета ущерба в результате уничтожения и (или) повреждения транспортного средства, в соответствии с Методическими рекомендациями [9]. Обеспечение транспортной безопасности является важнейшей составляющей национальной безопасности, отражающей состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства [10]. По существующим правилам учета пожаров не подлежат официальному статистическому учету случаи горения

автотранспортных средств, причиной которых явилось дорожно-транспортное происшествие⁷. В целом по данным МЧС России [11] за 2021 год в Российской Федерации на транспортных средствах произошло 17 249 ед. пожаров, что составляет 4,41 % от общего количества пожаров в России. Погибло 114 человек, материальный ущерб составил порядка 2 млрд. руб.

Транспорт - специфический и достаточно сложный объект для исследования и установления причины пожара. Исследование возгорания на транспортных средствах представляет большие трудности ввиду компактности узлов и агрегатов, быстротечности процесса. Из-за сильного теплового и пламенного воздействия уничтожается или сильно повреждается следовая картина на объектах-носителях [12].

При описании обстановки на месте пожара, сотрудники, производящие дознание, нередко испытывают трудности с наименованием тех или иных деталей и конструктивных элементов автомобиля. При сильных пожарах, уничтожаются и следы причин пожаров, поэтому проведение экспертизы в таких случаях практически невозможно. Сотрудники органов ГПН не являются субъектами оценочной деятельности, и, проводя дознание в целом делают обобщенный вывод о последствиях пожара, определяя местоположение очага возгорания и причину пожара.

В результате исследования формируется информационная (описательная) модель механизма возникновения и развития пожара [13]. Существующий подход, основанный на регистрации прямого материального ущерба только на основании документов собственника, показал свою неэффективность. Поэтому возникла необходимость в создании простого и доступного инструмента для сотрудников органов ГПН в целях определения материального ущерба от пожара в рамках статистического учета. В соответствии с Методическими рекомендациями, ущерб от уничтожения транспортного средства по расчетно-аналитическому методу определяется по формуле:

$$U_{mp, cp, i} = C_{mp, cp, i} \cdot (1 + (K_{экс. mp, cp} - 1) \cdot K_{рег mp, cp}), \quad (1)$$

где $C_{mp, cp, i}$ – стоимость i -го транспортного средства, руб.;

$K_{экс. mp, cp}$ – коэффициент, учитывающий срок эксплуатации i -го транспортного средства на момент пожара, безразмерный. Если i -е транспортное средство являлось автотранспортным средством, коэффициент $K_{экс. mp, cp}$ определяется в соответствии с данными электронной базы. Для других типов транспортных средств $K_{экс. mp, cp}$ принимается равным коэффициенту износа транспортного средства, определяемому в соответствии с документами бухгалтерского учета, либо $K_{экс. mp, cp} = 1$;

$K_{рег mp, cp}$ – поправочный климатический коэффициент, учитывающий влияние природно-климатических факторов на срок эксплуатации i -го транспортного средства, исходя из того, на территории какого субъекта Российской Федерации эксплуатировалось i -е транспортное средство, безразмерный. Если i -е транспортное средство являлось автотранспортным средством, коэффициент $K_{рег mp, cp}$ определяется в соответствии с данными электронной базы.

⁶ Приказ МЧС России от 28.01.2022 № 43 «Об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов государственного пожарного надзора»

⁷ Приказ МЧС России от 21 ноября 2008 г. № 714 «Об утверждении Порядка учета пожаров и их последствий» <https://www.mchs.gov.ru/dokumenty/normativnye-pravovye-akty-mchs-rossii/689>

Для других типов транспортных средств $K_{рег\ тр.ср} = 1$.

Если в электронной базе данных отсутствуют сведения о необходимом типе транспортного средства, то ущерб от уничтожения транспортного средства $U_{тр.ср.i}$ приравнивается к стоимости транспортного средства $C_{тр.ср.i}$, определяемой в соответствии с документами: бухгалтерского учета, определяющими остаточную балансовую стоимость; иными документами собственника, подтверждающими стоимость транспортного средства (например, договор купли-продажи, договор страхования и прочие).

Для поврежденного транспортного средства ущерб рассчитывается следующим образом:

– если $K_{ун.пл.тр.ср} + K_{нов.пл.тр.ср} \leq 1$, ущерб рассчитывается по формуле:

$$U_{тр.ср.i} = C_{тр.ср.i} \cdot (1 + (K_{экс.тр.ср} - 1) \cdot K_{рег\ тр.ср}) \cdot (K_{ун.пл.тр.ср} + K_{нов.пл.тр.ср}) \quad (2)$$

– если $K_{ун.пл.тр.ср} + K_{нов.пл.тр.ср} > 1$, ущерб рассчитывается по формуле:

$$U_{тр.ср.i} = C_{тр.ср.i} \cdot (1 + (K_{экс.тр.ср} - 1) \cdot K_{рег\ тр.ср}) \cdot (K_{ун.пл.тр.ср} + K_{нов.пл.тр.ср} \cdot (1 - K_{ун.пл.тр.ср})), \quad (3)$$

где $K_{ун.пл.тр.ср}$ - коэффициент, безразмерный, учитывающий степень повреждения транспортного средства, исходя из величины уничтоженной в результате горения площади транспортного средства $S_{ун.тр.ср.i}$, m^2 , с учетом общей площади транспортного средства.

$K_{нов.пл.тр.ср}$ - коэффициент, безразмерный, учитывающий степень повреждения транспортного средства, исходя из величины поврежденной в результате горения площади транспортного средства $S_{нов.тр.ср.i}$, m^2 , с учетом общей площади транспортного средства.

Так же, в Методических рекомендациях приведены математические модели расчета ущерба в результате уничтожения (повреждения) имущества на транспортных средствах.

В рамках автоматизации расчета материального ущерба в соответствии с Методическими рекомендациями были разработаны соответствующие алгоритмы и программное средство. На рисунке 1 представлен алгоритм поддержки принятия решений по расчету материального ущерба, в результате уничтожения пожаром транспортного средства.

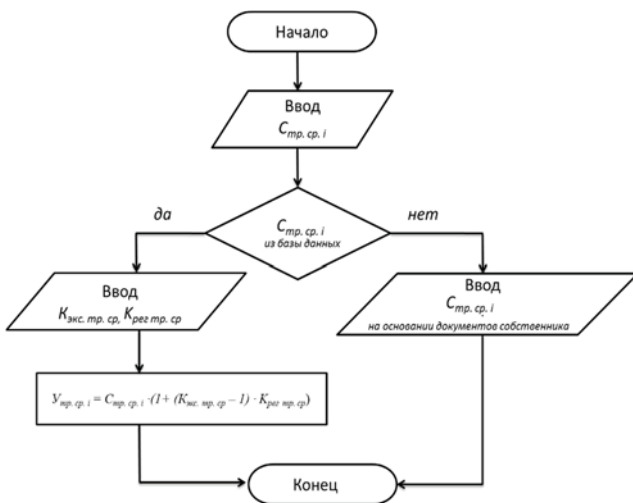


Рис. 1. Алгоритм поддержки принятия решений по расчету материального ущерба, в результате уничтожения пожаром транспортного средства

На основе алгоритмов было разработано программное средство, которое предназначено для расчета материального ущерба в результате уничтожения (повреждения) пожаром транспортного средства и имущества на транспортном средстве для применения должностными лицами органов ГПН в целях статистического учета пожаров и их последствий. Программа устанавливается на персональной электронно-вычислительной машине (далее - ПЭВМ) пользователя через соответствующий исполнительный файл с установкой необходимых для его работы программных библиотек.

В качестве языка программирования был выбран Microsoft Visual Studio Basic. Программное средство предназначено для работы на ПЭВМ x 86 - 64 bit совместимой архитектуры в операционной среде Microsoft Windows XP и старше. Отличительной особенностью языка является использование обычных переменных и констант с имеющимися объектами приложений Microsoft Office. Запуск программы осуществляется стандартным образом с последующим появлением стартового окна программы. На рисунке 2 представлено программное средство по расчету материального ущерба от пожара, нанесенного транспортным средствам.

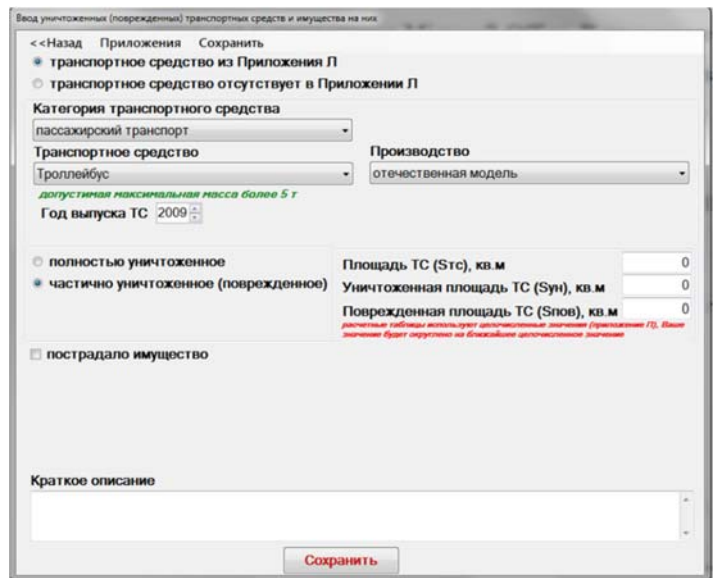


Рис. 2. Программное средство по расчету материального ущерба от пожаров, нанесенного транспортным средствам

В начале работы с программным средством предоставляется выбор субъекта Российской Федерации для того, автоматического определения и загрузки поправочного климатического коэффициента, учитывающего влияние природно-климатических факторов на срок эксплуатации транспортного средства, исходя из того, на территории какого субъекта Российской Федерации эксплуатировалось транспортное средство. Затем осуществляется переход в меню выбора транспортного средства и его параметров. В случае расчета ущерба по расчетно-аналитическому методу все необходимые данные загружаются автоматически при выборе типа транспортного средства. Если в справочнике отсутствует необходимый вид транспортного средства, то расчет проводится по прямому расчетному методу и необходимые параметры расчета вводятся вручную. Все расчетные данные формируются в итоговый отчет в виде таблицы.

Программное средство предоставляет возможность осуществлять ввод и редактирование данных для расчета, осуществляет расчёт статистической информации по заданному алгоритму, сохраняет полученные результаты расчетов. Результаты расчета экспортируются в приложения Microsoft Office. В программе предусмотрен встроенный электронный ключ ограничивающий срок действия программы.

Результаты и обсуждения

В ходе апробации программного средства по расчету материального ущерба, нанесенного пожаром транспортным средствам, была проведена отладка программы и исправление обнаруженных при этом ошибок. В результате сделаны выводы о корректности постановки задачи и разработанных математических моделях и алгоритмах. В качестве успешного примера практического применения программного средства по расчету ущерба рассмотрим проведенные расчеты материального ущерба в результате уничтожения (повреждения) пожаром пассажирских транспортных средств, таких как троллейбус, за 2021 год.

Троллейбус в России – широко распространенный вид транспорта. Троллейбусные системы сейчас действуют в 80 городах России [14]. По данным МЧС России [11] ежегодно на троллейбусах происходит порядка 15 ед. пожаров (см. рис. 3).

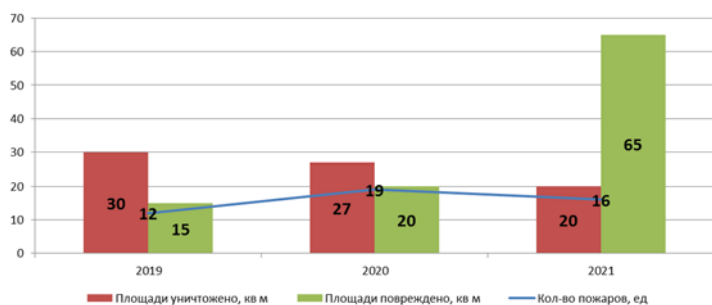


Рис. 3. Количество пожаров, уничтоженной и поврежденной площади на троллейбусах за 2019-2021 гг.

Основная причина возгорания на троллейбусах – неисправность электрооборудования транспортного средства. Прямой материальный ущерб составил: за 2019 год – 7 тыс. руб.; за 2020 год – 8 тыс. руб.; за 2021 год – 500 тыс. руб. Стоит сказать, что материальный ущерб от пожара за 2019 год зафиксирован только в двух случаях, аналогичные данные за 2020 год, в 2021 году ущерб зафиксирован в одном случае.

Результаты расчета материального ущерба от пожара на троллейбусах за 2021 год с использованием программного средства представлены в таблице 1. Для расчета использовались данные о среднем возрасте троллейбусов, эксплуатируемых в России. По данным государственной корпорации развития ВЭБ РФ⁸ средний возраст троллейбусов по итогам прошлого года составляет 12 лет.

Расчеты показали, что ущерб, определенный в соответствии с Методическими рекомендациями с помощью программного средства практически в 20 раз выше зафиксированного ущерба на троллейбусах за 2021 год.

Таблица 1

Расчет материального ущерба от пожаров на троллейбусах за 2021 год в Российской Федерации

Дата пожара	Площади уничтожено, м ²	Площади повреждено, м ²	Зафиксированный материальный ущерб	Расчетный ущерб, руб.
05.03.2021	0	1	0	515 069
09.04.2021	0	5	0	515 069
02.05.2021	0	1	0	515 069
02.05.2021	0	3	0	515 069
04.05.2021	0	1	0	515 069
14.05.2021	20	0	0	1 430 748
03.07.2021	0	1	0	515 069
08.07.2021	0	10	0	701 067
13.07.2021	0	1	0	515 069
25.08.2021	0	1	0	515 069
03.09.2021	0	1	0	515 069
20.09.2021	0	30	0	1 430 748
01.10.2021	0	1	0	515 069
07.11.2021	0	6	500 000	701 067
30.11.2021	0	1	0	515 069
01.12.2021	0	2	0	515 069
ИТОГО	20	65	500 000	9 929 389

Это показывает, что исследования, направленные на изучение причин пожаров на транспортных средствах необходимые для понимания рисков, а также возможности снижения и смягчения последствий пожаров в части, касающейся материального ущерба, не теряют свою актуальность [15].

Разработанное программное средство позволяет проводить автоматизированный расчет ущерба быстро и качественно в режиме реального времени за различные периоды, что влияет на оперативность получения информации должностными лицами органов ГПН и принятие управленческих решений в рамках риск-ориентированного подхода.

Заключение

Проведенные исследования показали необходимость совершенствования информационного обеспечения должностных лиц органов ГПН МЧС России, в том числе на основе поддержки принятия решений по расчету материального ущерба от пожаров. Учитывая, что входит в задачи профилактики пожарной безопасности, важно организовать не только техническое обеспечение, но и правильное информирование должностных лиц органов ГПН.

Отсутствие адекватных методов определения материального ущерба от пожаров приводит к тому, что показатель ущерба как результат последствий пожаров вообще не учитывается и выпадает из общей системы оценки эффективности деятельности ГПН [16,17].

⁸ Государственная корпорация развития ВЭБ РФ <https://вэб.рф/>

В связи с этим, не перестает быть актуальной проблема совершенствования методических подходов к оценке материальных последствий пожаров. Рассмотренные математические модели и разработанное программное средство, дают возможность получить достоверную информацию от систем сбора, обработки и хранения информации и осуществить быстрый анализ данных, применяя статистические и математические методы.

Расширение знаний о последствиях пожаров повышает информированность должностных лиц органов ГПН о возможных пожарных рисках на объектах защиты. Понимание того, улучшается или ухудшается система с точки зрения риска, является фундаментальной поддержкой для принятия решений, связанных с пожарной безопасностью. Основным результатом методологии является информация об ущербе, которому система может эффективно противостоять.

Литература

1. *Фоменкова А.В.* Информационные технологии в управлении // Молодой ученый. 2018. № 20 (206). С. 276-278.
2. *Товпинец К.А., Белодед Н.И.* Информационная система взаимодействия студентов и деканата учебного заведения // Информатизация образования и науки. 2016. № 4(32). С. 89-99.
3. *Савенкова А.Е., Завьялов Д.Е., Шимов Д.Р.* Применение цифровых технологий при обеспечении пожарной безопасности в работе надзорных органов // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". 2020. № 4. С. 6-11.
4. *Пельтихина С.В., Баженова Л.М.* Статистика пожаров. Влияние текущих параметров на обстановку с пожарами // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2017. № 4 (23). С. 32-35.
5. *Загуменнова М.В., Порошин А.А., Фирсов А.Г.* Методологический подход к определению материального ущерба от пожаров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4(40). С. 64-79. DOI 10.21685/2227-8486-2021-4-6.
6. *Загуменнова М.В., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Порошин А.А.* Оценка материального ущерба от пожаров на основе базисно-индексного метода // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий, Москва, 12-16 мая 2021 г. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. С. 299-306.
7. *Загуменнова М.В.* Математические модели расчета прямого материального ущерба в результате уничтожения и повреждения площади объекта строительства // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения, Иваново, 10-11 ноября 2021 года. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2021. С. 648-652.
8. *Малемина Е.Н., Фирсов А.Г., Загуменнова М.В., Арсланов А.М.* Обзор существующих международных методик и научных подходов к определению материального ущерба от пожаров // Пожарная и технологическая безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 3(10). С. 270-274.
9. *Козлов А.А., Полехин П.В., Чебуханов М.А.* и др. Методические рекомендации об организации расчета материального ущерба от пожаров должностными лицами органов государственного пожарного надзора. 1-е издание, дополненное. Балашиха: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. 129 с.
10. *Тушко И.С.* Оценка уязвимости транспорта. Эффективность и методы улучшения. Безопасность и охрана труда на железнодорожном транспорте. 2019;6.
11. *Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И.* и др. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: Статистика пожаров и их последствий. Статистический сборник. Балашиха: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. 114 с.
12. *Дашко Л.В., Довбня А.В., Ключников В.Ю., Плотникова Г.В.* Применение методов термического анализа при исследовании влияния температуры на фрикционную основу тормозных колодок автомобиля // Пожаровзрывобезопасность. 2013. №6.
13. *Яцуценко П.В.* Осмотр транспортного средства, поврежденного огнем в результате поджога // Научный взгляд в будущее. 2021. Т. 1. № 23. С. 95-101. DOI 10.30888/2415-7538.2021-23-01-004.
14. *Аришинова С.М., Аришинов С.А.* Обеспечение пожарной безопасности при пассажироперевозках на городском электрическом транспорте // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 7(78). С. 69-73.
15. *Пасовец В.Н., Ковтун В.А., Тагиев Ш.Ш.* Пожары на автомобильных транспортных средствах: причины возникновения // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2022. №2. DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-2.228>
16. *Нектегяев Г.Г., Борисов А.И.* Влияние последствий пожаров на экономику Российской Федерации // Московский экономический журнал. 2019. № 8. С. 63. DOI 10.24411/2413-046X-2019-18061.
17. *Полехин П.В., Порошин А.А., Загуменнова М.В., Фирсов А.Г.* Экономические последствия пожаров на объектах промышленности // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 7. С. 29-34. DOI 10.24000/0409-2961-2022-7-29-34.

MODELS AND ALGORITHMS TO SUPPORT DECISION-MAKING ON THE CALCULATION OF MATERIAL DAMAGE FROM FIRE ON VEHICLES

Marina V. Zagumenнова, All-Russian Research Institute of Fire Defense, EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia, otdel-16@vniipo.ru

Abstract

Transport security occupies an important place in the system of sustainable functioning of a smart city. Ground electric transport is one of the main passenger carriers within cities. The constant development of technologies in the field of transport and information leads to the need to pay more attention to the problems existing in this industry. The article explores the issues of information support for officials of the state fire supervision authorities of the EMERCOM of Russia on the basis of decision support on the calculation of material damage from fires using the example of calculating damage as a result of the destruction of vehicles. A mathematical model for calculating material damage from a fire on a vehicle is considered in accordance with the Methodological Recommendations on the organization of the calculation of material damage from fires of the EMERCOM of Russia. An algorithm and a software tool for calculating material damage caused by fire to vehicles are presented. Calculations of material damage as a result of the destruction (damage) of a vehicle by fire using a software tool are carried out and conclusions are drawn about the adequacy and correctness of the methods and algorithms used to support decision-making by officials of the state fire supervision authorities of the EMERCOM of Russia.

Keywords: material damage, vehicles, algorithm, state fire supervision authorities, software.

References

1. A.V. Fomenkova (2018). Information Technology in Management. *Young scientist*. No. 20 (206). P. 276-278.
2. K.A. Tovpinets, N.I. Beloded (2016) Information system of interaction between students and the dean of an educational institution. *Informatization of education and science*. No. 4(32). P. 89-99.
3. A.E. Savenkova, D.E. Zavyalov, D.R. Shimov (2020) The use of digital technologies in ensuring fire safety in the work of supervisory authorities. *Scientific and analytical journal "Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service EMERCOM of Russia."* No. 4. P. 6-11.
4. S.V. Peltikhina, L.M. Bazhenova (2017) Fire statistics. Impact of current parameters on the situation with fires. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. No. 4 (23). P. 32-35.
5. M.V. Zagumenнова, A.A. Poroshin, A.G. Firsov (2021) Methodological approach to determining material damage from fires. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. No. 4(40). P. 64-79. DOI 10.21685/2227-8486-2021-4-6.
6. M.V. Zagumenнова, A.G. Firsov, V.I. Sibirko, A.A. Poroshin (2021) Assessment of material damage from fires based on the base index method. *Actual fire safety problems: materials of the XXXIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Science and Technology, Moscow, May 12-16, 2021*. Moscow: FSBI VNIPO EMERCOM of Russia. P. 299-306.
7. M.V. Zagumenнова (2021) Mathematical models for calculating direct material damage as a result of destruction and damage to the area of the construction object. *Fire and emergency safety: a collection of materials from the XVI International Scientific and Practical Conference dedicated to the holding of the Year of Science and Technology in the Russian Federation in 2021 and the 55th anniversary of the educational institution, Ivanovo, November 10-11, 2021*. Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Management,". P. 648-652.
8. E.N. Malemina, A.G. Firsov, M.V. Zagumenнова, A.M. Arslanov (2021) Review of existing international methods and scientific approaches to determining material damage from fires. *Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*. No. 3(10). P. 270-274.
9. A.A. Kozlov, P.V. Polekhin, M.A. Chebukhanov et al. (2022) Methodological recommendations on the organization of calculation of material damage from fires by officials of state fire supervision bodies. 1st edition, supplemented. Balashikha: All-Russian Order "Badge of Honor" Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Management. 129 p.
10. I.S. Tushko (2019) Assessment of the vulnerability of transport. Efficiency and improvement methods. *Safety and Occupational Safety in Railway Transport*. No. 6.
11. V. S. Goncharenko, T. A. Chechetina, V. I. Sibirko et al. (2022) Fires and fire safety in 2021: Statistics on fires and their consequences. Statistical collection. Balashikha: All-Russian Order "Badge of Honor" Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Management. 114 p.
12. L.V. Dashko, A.V. Dovbnya, B.Yu. Klyuchnikov, G.V. Plotnikova (2013) Application of thermal analysis methods when studying the effect of temperature on the friction base of car brake pads. *Fire and explosion safety*. No. 6.
13. P.V. Yatsutsenko (2021) Inspection of a vehicle damaged by fire as a result of arson. *Scientific look into the future*. Vol. 1. No. 23. P. 95-101. DOI 10.30888/2415-7538.2021-23-01-004.
14. S.M. Arshinova, S.A. Arshinov (2013) Ensuring fire safety during passenger transportation by urban electric transport. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. No. 7(78). P. 69-73.
15. V.N. Pasovets, V.A. Kovtun, S.H. (2022) Tagiyev Motor vehicle fires: causes. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Belarus*. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-2.228>
16. G.G. Nektogyaev, A.I. Borisov (2019) The impact of the consequences of fires on the economy of the Russian Federation. *Moscow Economic Journal*. No. 8. P. 63. DOI 10.24411/2413-046X-2019-18061.
17. P.V. Polekhin, A.A. Poroshin, M.V. Zagumenнова, A.G. Firsov (2022) Economic consequences of fires at industrial facilities. *Occupational safety in industry*. No. 7. P. 29-34. DOI 10.24000/0409-2961-2022-7-29-34.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ARIMA ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВАГОНПОТОКОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41

Manuscript received 10 December 2022;
Accepted 15 January 2023

Маловецкая Екатерина Викторовна,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия, katerina8119@mail.ru

Мозалевская Анна Константиновна,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия, Mozalevskaya@mail.ru

Ключевые слова: метод, модель, имитационная модель, прогноз, временной ряд, системный подход, неравномерность, планирование и прогнозирование транспортных потоков, линейное и динамическое программирование, теория больших систем

В представленной работе дается оценка современному состоянию разработок в области неравномерности железнодорожных перевозок и проблем принятия эффективных управленческих решений по организации перевозочного процесса на полигонах курсирования. Представлен сравнительный анализ результатов прогнозирования вагонопотоков с помощью различных моделей. В основе была использована ARIMA модель. В качестве альтернативного варианта построения вагонопотоков по стыковым пунктам дорог, рассмотрен адаптивный метод прогнозирования, в частности, метод двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса. Оптимизация использования инфраструктуры может произойти вследствие анализа проблем неравномерного поступления потоков вагонов, поиска различия колебаний, которые неизбежны, от перерывов или сгущений, которые возникают из-за неэффективности формирования процесса перевозки, а также их последующее регулирование, создания необходимых механизмов, которые снизят неравномерность. Дается оценка использования различных математических моделей с последующей возможностью формирования прогнозных моделей отклонений вагонопотоков в пределах полигонов сети. Основное внимание уделяется прогнозированию временных рядов (TSF), на основе которых в дальнейшем можно строить прогнозные модели отклонений вагонопотоков. Проведён сравнительный обзор способов и средств формирования прогнозных моделей изменения вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог, работающих в едином технологическом пространстве. Оценивается использование временных рядов в качестве математического аппарата построения имитационных моделей прогноза колебаний вагонопотоков и погрузки. Рассмотрены перспективы использования имитационного моделирования в качестве инструмента для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог, имеющих единый центр управления. На основе проведённого анализа предлагается ряд направлений расширения существующей методологической базы построения имитационных моделей железнодорожных перевозок.

Информация об авторах:

Маловецкая Екатерина Викторовна, к.т.н., доцент кафедры "Управление эксплуатационной работой" ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Мозалевская Анна Константиновна, соискатель ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Для цитирования:

Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К. Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 33-41.

For citation:

Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K. (2023) Possibilities of application of ARIMA models in building forecast values of car-flows. T-Comm, vol. 17, no. 1, pp. 33-41. (in Russian)

Введение

Имея представление о тенденциях дальнейшего развития транспортной системы и железнодорожного транспорта, в частности, можно уже сейчас принимать оперативные решения, вносить корректировки в программы и планы развития, способствующие получению наилучших результатов [1-5]. Все это может быть достигнуто посредством построения прогнозов транспортных потоков и анализа временных рядов, составленных на основе исторических данных.

Прогнозирование данных различных по своей природе временных рядов является достаточно сложной задачей, главным образом из-за беспрецедентных изменений тенденций и условий, с одной стороны, и отсутствия полной информации, с другой стороны. Поэтому необходимо оценивать, насколько точными являются прогнозы, особенно при применении разнообразных методик прогнозирования. Например, при прогнозировании с применением регрессионного анализа, так как при его использовании имеется множество ограничений. Главная цель настоящего материала – провести исследование и выявить, какие именно методы прогнозирования влияют на получение наиболее точных прогнозов и допускают наименьшее количество ошибок.

Проведение прогнозного анализа, позволяющего адекватно оптимизировать работу наличных инфраструктурных элементов в увязке с колебаниями вагонопотоков, требует использования математического аппарата, в том числе временных рядов, применение которых позволяет учитывать различного рода неравномерности, а также имитационных моделей [6-10]. При наличии у вагонопотоков свойства неравномерности также возникает необходимость в её учёте и оценке перспектив изменения вагонопотоков, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог [11-15].

В предлагаемой статье проведён анализ современного состояния разработок в области построения прогнозных моделей колебаний вагонопотоков с использованием математических моделей различного вида.

1. Особенности задач планирования железнодорожных перевозок

Исторически планирование перевозок грузов началось в России в 1918 году. Именно в указанный период В.И. Ленин подписал декрет, именуемый «О пределах компетенции Народного комиссариата путей сообщения в деле транспорта». В упомянутом документе была отражена следующая информация:

1. Народный комиссариат путей сообщения являлся единственным органом, который не только руководил транспортным делом касательно создания и исполнения планов, но и занимался объединением вышеуказанного.

2. Лица и иные ведомства, которые были заинтересованы в перевозках, могли составлять исключительно предварительные планы перевозочной деятельности.

Дальнейшие разработки плановых задач осуществлялись методами моделирования перевозок грузов, получивших широкое развитие в СССР в конце 1970 г. В основу методов был заложен принцип поиска основополагающих факторов, определяющих перспективную траекторию развития.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество методов прогнозирования, в том числе применяемых на железнодорожном транспорте. Наибольшее распространение при решении задач по прогнозированию транспортных потоков получили интуитивные методы (метод экспертных оценок, прогнозирования по образу, метод исторических аналогий) и формализованные методы (экстраполяция, моделирование).

Основные модели, используемые при прогнозировании грузовых перевозок, можно разделить на три блока:

- модели на основе анализа временных рядов;
- балансовые модели;
- модели интеллектуального анализа данных (рис. 1).



Рис. 1. Классификация моделей прогнозирования грузовых перевозок

Базовыми показателями, представляющими интерес для дальнейшей разработки стратегии развития и принятия решений, являются:

- реднесуточная погрузка, которая измеряется в вагонах;
- объем перевозок (количество отправленных), который считается в вагонах или тоннах, в том числе на основании имеющейся номенклатуры грузов;
- средняя дальность грузоперевозок – измеряется в километрах;
- оборот грузов – измерение происходит в тарифных тонно-километрах;
- грузонапряженность, измеряется в миллионах тонно-километрах на один километр, а также средняя, в том числе по конкретным направлениям;
- средняя статическая нагрузка вагона, расчет которой осуществляется в тоннах [6].

Продуктивность мероприятий по планированию зависит от проведения анализа изменения того или иного показателя, в том числе мощности вагонопотоков с учётом различного рода неравномерностей. Методы детализированной оценки колебаний вагонопотоков базируются на применении математического аппарата, такого как: временные ряды, статистические методы, построение зависимостей и др.

Формирование адекватных имитационных моделей на основе перечисленных способов позволяет учесть колебания вагонопотоков за различные периоды, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог, что актуально на данный момент в связи с внедрением полигонных технологий управления железнодорожным транспортом.

II. Обзор разработок в области оценки неравномерностей на железнодорожном транспорте

Для построения математических моделей транспортных потоков активно применялись следующие методы:

- теории массового обслуживания;
- теории вероятности;
- линейного программирования.

Кроме того, была создана дорожно-сетевая модель, которая оценивала влияние неравномерности грузоперевозок, а также трудностей в применении парка вагонов некоторых железных дорог (далее также – ж/д) на работу других направлений сети [16-22]. В данном тренде активно применялись подходы, которые были связаны с применением гидродинамической модели. Производился анализ таких терминов, как «ударные волны», «волны разряжения», «распад разрыва», которые считаются главными в теории газовой динамики.

Целью анализа временных рядов является изучение траекторий наблюдений временных рядов и построение модели для описания структуры данных и прогнозирования будущих значений временных рядов. В связи с важностью прогнозирования временных рядов во многих отраслях прикладных наук требуется построить эффективную модель с целью повышения точности прогнозирования. В научной литературе были разработаны различные модели прогнозирования временных рядов [23-30].

Прогнозирование временных рядов традиционно выполняется в эконометрике с использованием моделей ARIMA, которые обобщены Боксом и Дженкинсом. ARIMA уже давно является стандартным методом прогнозирования временных рядов.

Несмотря на то, что модели ARIMA широко распространены при моделировании экономических и финансовых временных рядов, они имеют некоторые серьезные ограничения. Например, в простой модели ARIMA трудно смоделировать нелинейные взаимосвязи между переменными. Кроме того, предполагается, что в модели ARIMA существует постоянное стандартное отклонение ошибок, которое на практике может не выполняться. Когда модель ARIMA интегрируется с обобщенной моделью авторегрессионной условной гетероскедастичности (GARCH), это предположение может быть смягчено. С другой стороны, оптимизация модели GARCH и ее параметров может быть сложной и проблематичной.

III. Состояние разработок в области имитационного моделирования транспортных процессов

Разработке методики имитационного моделирования железнодорожных станций и направлений посвящено достаточно большое количество научных работ: разработаны математические модели для имитации процесса поездобразования и продвижения поездов на сети с использованием объектно-ориентированной системы моделирования.

Среди имитационных моделей функционирования железнодорожной сети интересен опыт ученых БИЛИЗТА. Предложена система автоматизированного создания имитационной модели железнодорожной сети на основе имитационных моделей железнодорожных станций, входящих в ее состав. Разработанные модели станций формализованы на базе теорий массового обслуживания и сетевого планирования. Основными недостатками данных моделей является сложность их построения и дискретность в моделировании работы железнодорожной сети, то есть работа каждой станции сети моделируется автономно, а полученные результаты являются исходными данными для моделирования работы следующей станции. Это не позволяет применять такие модели для исследования работы железнодорожной сети в условиях оперативного управления организацией вагонопотоков.

IV. Особенности формирования прогнозов на железнодорожном транспорте

В настоящее время при исследовании объектов железнодорожного транспорта применяются разнообразные методики, осуществляется прогноз расчетов на базе разделения эксплуатационных характеристик на две части – случайные отклонения от тенденции развития и сама тенденция. Указанное происходит ввиду того, что установка длительных тенденций, которые отражают изменение характеристик с учетом перспективы, – одна из наиболее важных задач в процессе прогнозирования роста любой области народного хозяйства (далее также – НХ), в том числе и транспортной. В имеющейся системе непрерывающегося планирования производится анализ будущего развития областей НХ.

Одним из основных направлений в области прогнозирования транспортных потоков является анализ эксплуатационных показателей их изменения с учетом влияния отраслей промышленности и общей экономической ситуации. Для получения детализированной картины необходим анализ как количественных, так и качественных показателей, для построения адекватной картины дальнейшего развития. В этом случае необходимо применение прогнозных методик, основанных на теории вероятностей с учетом внутренних и внешних факторов при условии неопределенности событий.

При оценке отраслей промышленности необходимо учитывать различия в технологиях расчета и оценки показателей при учете того обстоятельства, что при прогнозировании на длительный период меньше внимания уделяется деталям, что, в свою очередь, выявляет необходимость обнаружения факторов, влияющих на перевозочный процесс в зависимости от конкретной ситуации, к примеру, соотношение грузовых поездопотоков и производственных мощностей различных уровней. При решении такого рода задач могут быть использованы логические методы [8, 15, 31].

Некоторые ученые применяли количественные методики прогнозирования деятельности транспорта, в частности, обоснование целесообразности использования балансового метода – метода прямого счета при планировании на 5- и 10-летний временной промежуток. Если прогнозирование производится на более длительный период, то ученый советует использовать метод косвенных расчетов, в котором применяются динамические ряды показателей [12, 14 – 17].

Также были осуществлены исследования по региональному планированию транспортных показателей. Под руководством и при участии некоторых авторов на Украине была осуществлена разработка методик регионального планирования показателей для всех видов магистрального транспорта на территории страны [15].

В.Л. Иванов и С.П. Кузнецов в более поздний период времени тоже выполнили методические работы по региональному планированию. Упомянутый первым исследователь применил следующие методы: математико-статистический, экспертных оценок и расчетно-аналитический и определил транспортные показатели на территории РФ на будущий период. Вторым были осуществлены такие же расчеты, но по автомобильному транспорту РФ.

В процессе прогнозирования были использованы нормативные показатели развития областей НХ РФ, а также экстраполяционные модели динамического ряда. Планирование объемов транспортной работы осуществлялось и зарубежными учеными. Например, в трудах Л. Фишмана, Дж. Фишера и Т. Ландсберга определены прогнозы работы перевозок транспорта Америки на период до 1980 и до 2000 годов. Они строили прогноз на анализе зависимости валового национального дохода и транспорта. Данная зависимость была применена и шведским исследователем Г. Тутелиусом при планировании грузоперевозок и выборе транспортных средств [15].

Полином, являющийся аппроксимацией временного ряда исследуемого показателя, – математическая основа экстраполяционных методов. Указанные методы дополняются с учетом применения автокорреляции в некоторых рядах динамики, когда есть уровень зависимости между значениями параметра, который включен в динамический ряд, становится значительным. Дополнение производится при использовании многофакторной математической модели анализа с применением факторов-аргументов, которые запаздывают во времени. Указанный вариант модели был исследован в трудах Г.В. Бондаренко и С.Г. Круглова.

Целью данного исследования является анализ и характеристика современных методов прогнозирования и стратегического планирования железнодорожных перевозок. Научная новизна полученных результатов заключается в углублении теоретических положений по прогнозированию и стратегическому планированию железнодорожных перевозок, в частности развитие теоретико-методических подходов к выбору метода прогнозирования и стратегического планирования железнодорожных перевозок на предприятиях и организациях.

Теоретическую основу исследования прогнозирования и планирование деятельности железнодорожного транспорта составили научные труды зарубежных и отечественных ученых, таких как: Ачкасов А. Е., Баурос Д., Бланк И.А., Губанов В. А., Голубков Е. П., Ламберт Д. М., Сток Дж. Р., Старостина А. О., Лахтионова Л. А., Лушкин В. А., Луис Р., Мазараки А. А., Пономарев В. Д., Носова С. С., Шеремет А. Д., Сайфулин Р. С. Ялдин И.В. и много других. Однако, несмотря на значительный объем научных разработок, и публикаций по теории организации деятельности в сфере перевозок, проблема управления логистикой перевозок в условиях нестабильности транспортного потока остается открытой.

V. Сравнительный анализ прогнозирования вагонопотоков

Работа транспортной сети и, в частности, железнодорожной составляющей связана со значительными изменениями, что особенно заметно в последнее время. Санкционное давление на экономику страны сохраняется, и транспортная отрасль приспосабливается к работе в новых меняющихся условиях, что делает более сложным выбор и принятие точных и верных управленческих решений на всех уровнях системы.

Изменение транспортно-логистических потоков еще более увеличивает нагрузку на Восточный полигон, имеющий достаточное количество участков с лимитированной пропускной способностью. В связи с этим требуются грамотные прогнозы вагонопотока и его баланс, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог.

Основная цели построения прогнозных моделей – отражение влияния реальных производственных процессов без учета случайных возмущений, носящих нерегулярный характер. При формировании прогноза на перспективу главенствующая роль отводится учету основных тенденций развития с учетом возможных сценариев. В связи с этим, необходимо достаточно тщательно подходить к выбору методов и моделей прогнозирования.

В представленной работе на первом этапе построения модели временного ряда (ВР) используется модель Бокса-Дженкинса (Box-Jenkins approach). Box-Jenkins модель является моделью авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) или в англоязычном варианте Autoregressive Integrated Moving Average mode (ARIMA).

При анализе исторических данных в рассматриваемом ВР нет отчетливо выраженных регулярных составляющих. Отдельные наблюдения могут содержать значительные ошибки, что мешает не только выделить регулярные компоненты, но также построить прогноз. Методология ARIMA позволяет осуществить выбор регулярных компонент.

В представленной модели рассматривают два основных процесса:

1. Процесс авторегрессии (AR):

При условии содержания во временном ряду (ВР) элементов, последовательно зависящих друг от друга, ВР можно представить в следующем виде:

$$y_t = z + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + a_3 y_{t-3} + \dots + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где z – константа; a_1, a_2, a_3 – параметры авторегрессии.

Здесь каждый элемент ряда – это сумма случайной компоненты, а также линейной комбинации предыдущих наблюдений.

2. Процесс скользящего среднего (МА):

Отличие данного процесса от предыдущего заключается в наличие суммарное воздействие предыдущих ошибок на каждое последующее наблюдение. Такой процесс имеет следующий вид:

$$y_t = \mu + e_t - b_1 \varepsilon_{t-1} - b_2 \varepsilon_{t-2} + b_3 \varepsilon_{t-3}, \quad (2)$$

где μ – константа; b_1, b_2, b_3 – параметры МА.

Можно сделать вывод о том, что текущее наблюдение ряда является суммой случайной компоненты в этот момент

и линейной комбинации случайных воздействий в предыдущие моменты времени.

В эконометрических исследованиях чаще всего используют модели ARIMA (p, d, q), значения параметров которой принимают значения не больше числа 2. При этом параметры p и q определяют порядок авторегрессионной составляющей и порядок скользящего среднего (для этого рассматривают модели ARMA (p, q) – модели авторегрессии со скользящими средними) соответственно, а параметр d – порядок разности (дискретной производной)

Общий вид ARIMA модели:

$$\Delta_{yt}^d = c + \sum_{i=1}^p a_i \mu \cdot \Delta^d y_{t-1} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где ε_t – стационарный временной ряд; c, a_i , b_j - параметры модели; Δ^d – оператор разности.

Для выбора необходимого количества параметров каждого ряда, воспользуемся графиками автокорреляционной функции (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ), представленными для ряда Петровский Завод на рисунках 2 и 3.

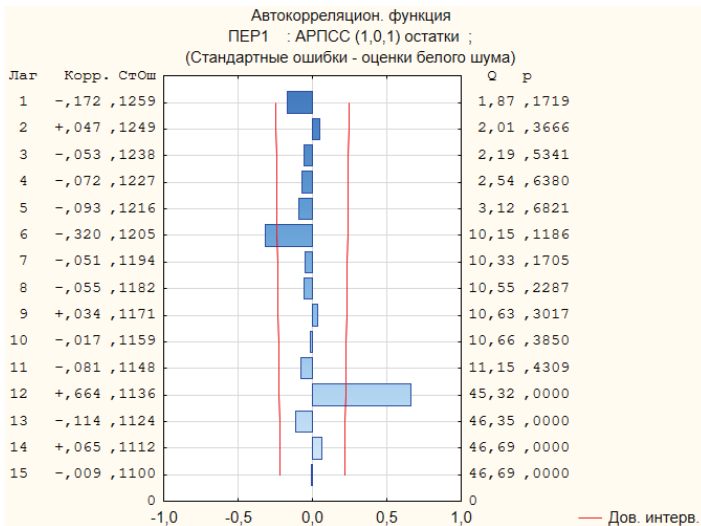


Рис. 2. Автокорреляционная функция для ВР Петровский Завод

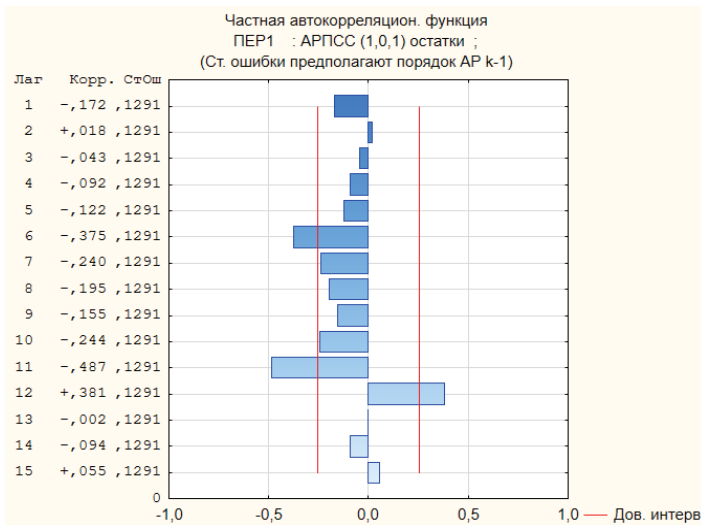


Рис. 3. Частная автокорреляционная функция для ВР Петровский Завод

АКФ процесса вычисляется в соответствии с рекуррентным соотношением по первым p ее значениям $y(1), \dots, y(p)$. ЧАКФ процесса будет иметь ненулевые значения лишь при $\tau \leq p$; все значения $y_{\text{част}}(p)$ при $\tau > p$ будут нулевыми. Данное свойство ЧАКФ AR(p) – процесса используется при выявлении порядка в модели авторегрессии для конкретных анализируемых ВР. В случае, когда все частные коэффициенты автокорреляции, начиная с порядка k, статистически незначимо отличаются от нуля, то порядок модели авторегрессии определяют равным $p = k - 1$. В представленной статье авторами каждый ВР был рассмотрен отдельно, поскольку все исследуемые ВР являются нестационарными, что подтверждено тестом Дики-Фуллера.

Таблица 1

Графики АКФ и ЧАКФ и их свойства

Функция	ARMA (1, 0)	ARMA (2, 0)	ARMA (0, 1)	ARMA (0, 2)	ARMA (1, 1)
АКФ	Экспоненциально затухает	Экспоненциально затухает или имеет форму синусоидальной волны	Пик на лаге 1	Пики на лагах 1 и 2	Экспоненциально затухает от значения $r(1)$
ЧАКФ	Пик на лаге 1	Пики на лагах 1 и 2	Экспоненциально затухает	Экспоненциально затухает или имеет форму синусоидальной волны	Экспоненциально затухает от значения $r_p(1)$

При идентификации ARIMA-моделей необходимо подобрать порядок d модели. Последовательные структурирования рассматриваемого процесса y_t с помощью операторов Δ , Δ^2 , ... Δ^d направлены на устранение его нестационарности. До тех пор, пока $l < k$ процессы Δ_{yt}^l будут оставаться нестационарными и это будет характеризоваться отсутствием быстрого спада в поведении выборочной АКФ. Поэтому предполагается, что необходимая для получения стационарности степень k разности Δ достигнута, если АКФ ряда быстро затухает. После подбора порядка k анализируется уже не сам ряд y_t , а его k-е разности. Идентификация ВР сводится к идентификации ARMA (p,q) моделей. Согласно проведенным исследованиям, для всех рядов будет принят порядок модели $d=1$, основанный на анализе поведения АКФ исследуемых ВР.

Для осуществления проверки модели на адекватность, были рассчитаны следующие ошибки прогноза:

- те ущая сумма ошибок прогноза RSFE;
- среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Derivation, MAD) измеряет точность прогноза, усредняя величины ошибок прогноза (абсолютные значения каждой ошибки);
- среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error, MSE);
- средняя абсолютная ошибка в процентах (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) вычисляется путем отыскания

абсолютной ошибки в каждый момент времени и деления ее на действительно наблюдаемое значение;

– трекинг сигнал TS – это мера, показывающая отклонение ошибки прогноза в большую или меньшую сторону.

Определенные выше способы оценки точности прогноза используются для следующих целей:

- сравнение точности прогноза двух различных методов;
- оценка адекватности и надежности метода
- выявление наиболее оптимального метода.

Для исследуемых рядов были выполнены проверки с использованием показателей $MAD, MSE, MAPE, MPE, RSFE, TS$ (табл. 2).

Таблица 2

Результаты проверок модели на адекватность

Стыковой пункт	MAD	MSE	$MAPE$	MPE	TS
Тайшет	13,68	338,05	0,01	0,00009	MIN -6.19 MAX 7.44
Мариинск	32,17	2247,94	0,01	0,00020	MIN -6.73 MAX 6.63
Петровский Завод	30,6	1682,2	0,01	0,00006	MIN -7.31 MAX 4.99
Архара	92,6	7620,89	0,01	0,000202	MIN -7.59 MAX 5.85

Полученная модель является достаточно точной, так как средняя абсолютная ошибка (MAPE) составляет 1%. Сформированный прогноз, является «мягким» поскольку присутствует выход трекинг-сигнала за пределы (-4;4), но находящегося в пределах (-7;7). Модель проходит проверку на адекватность.

По итогам проводимых исследований были построены графики фактических значений и моделей прогноза исследуемых временных рядов, представленные на рисунках 4, 5.



Рис. 4. Очищенный ВР Петровский завод от сезонности и функция тренда



Рис. 5. Фактические значения и модель ARIMA прогноза колебаний вагонопотоков по стыковому пункту Петровский Завод ЗаБЖД

Полученные результаты, отображенные на графике и значениями AIC, показывают, что модель ARIMA является адекватной и удовлетворяет критерию качества при выбранном наборе параметров. Таким образом, их можно использовать для построения прогноза вагонопотоков с целью получения достоверного результата.

При построении прогнозных моделей, для выбора оценочных вариантов, наиболее эффективно построение нескольких вариантов математических моделей. В качестве альтернативного варианта построения прогноза вагонопотоков по стыковым пунктам дорог, рассмотрен адаптивный метод прогнозирования, в частности, метод двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса. Данный метод возможен к применению при наличии в исследуемых ВР тренда. При этом в рассматриваемом методе в каждом периоде обновляются компоненты: уровень и тренд ряда. Уровень представляет собой сглаженное значение данных в конце каждого периода, а тренд – сглаженное значение среднего роста в конце каждого периода.

Метод Хольта-Уинтерса в общем виде описывает система уравнений:

$$\begin{cases} \hat{Y}_{t+p} = (L_t p + T_t) S_{t-s+p}; \\ L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}); \\ T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}; \\ S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s}, \end{cases} \quad (4)$$

где L_t – оценка текущего уровня; α – константа сглаживания для данного уровня; Y – новое наблюдение или реальное значение величины за период; β – константа сглаживания для оценки тренда; T_t – оценка тренда; γ – константа сглаживания для оценки тренда; S_t – оценка сезонности; p – количество периодов в будущем, на которое строится прогноз; s – длительность периода сезонного колебания; \hat{Y}_{t+p} – прогноз на p периодов вперед.

Как и в методе линейного экспоненциального сглаживания Хольта, веса α, β и γ могут выбираться субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования, например, значения MSE. Наиболее подходящей методикой для определения этой величины является алгоритм нелинейной оптимизации констант сглаживания. Фактические значения и модель прогноза, построенная с помощью модели двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Фактические значения и модель Хольта-Винтерса прогноза колебаний вагонопотоков по стыковому пункту Петровский Завод ЗаБЖД

После построения двух варианта математических моделей: на основе ARIMA модели и методом Хольта-Винтерса, для каждой из них были рассчитаны параметры точности и адекватности. Для исследуемых ВР были выполнены проверки с использованием показателей *MAD, MSE, MAPE, MPE, RSFE, TS*.

Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты проверок моделей на адекватность

Модель	MAD	MSE	MAPE	MPE	TS
АРПСС	2840,48	14090510,17	0,0227	0,0013	MIN -1.1 MAX 7.6
Хольт-Винтерс	3952,13	24020976,21	0,0314	0,0022	MIN -6.99 MAX -0.84

Обе модели являются «мягкими» из-за трекинг сигнала, выходящего за границы диапазона (-4;4), но находящегося в пределах (-8;8).

Модель, построенная методом тренда и сезонности, оказалась более точной ввиду меньшего значения среднеквадратического отклонения: $MAPE_1=2,27\%$ и $MAPE_2=3,14\%$. Теперь следует посмотреть на распределение остатков модели рисунк 7.

Empirical Distribution Test for SERIES01
Hypothesis: Normal
Date: 01/09/21 Time: 04:59
Sample: 1 60
Included observations: 60

Method	Value	Adj. Value	Probability
Lilliefors (D)	0.086918	NA	> 0.1
Cramer-von Mises (W2)	0.065172	0.065715	0.3183
Watson (U2)	0.065042	0.065584	0.2828
Anderson-Darling (A2)	0.361607	0.366353	0.4338

Method: Maximum Likelihood - d.f. corrected (Exact Solution)

Parameter	Value	Std. Error	z-Statistic	Prob.
MU	126148.6	1035.567	121.8159	0.0000
SIGMA	8021.470	738.4361	10.86278	0.0000
Log likelihood	-624.0289	Mean dependent var.		126148.6
No. of Coefficients	2	S.D. dependent var.		8021.470

Рис. 7. Итоги теста на нормальное распределение остатков модели АРПСС

Итоги тестов на нормальное распределение остатков показывают уровень значимости 5%, соответственно нельзя отклонить гипотезу о нормальности распределения остатков. А это, в свою очередь, свидетельствует о правильности выбранной модели. Поэтому для прогноза колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам полигона была использована модель на основе тренда и сезонности.

Заключение

В заключении хотелось бы отметить, что на сегодняшний день в России не сформирован единый подход к построению прогнозных моделей грузовых перевозок. Наличие широкого спектра разнонаправленных исследований в данной области не способствует выработке единого направления дальнейшего развития.

Большое количество способов и средств детализированной оценки колебаний транспортных потоков позволяет осуществлять планирование и прогнозирование перевозочного процесса, в том числе и на железнодорожном транспорте, с различной долей точности. Однако, в условиях постоянно меняющейся оперативной обстановки и наличия различного рода неравномерностей, в вопросах прогнозирования имеют место нерешённые вопросы.

Таким образом, в плане дальнейшего проведения научных исследований, вопрос неравномерности транспортных потоков, в частности, вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог в условиях полигонных технологий, является достаточно актуальным.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года УТВЕРЖДЕНА распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Белозеров О.В. Доклад генерального директора -председателя правления открытого акционерного общества "Российские железные дороги" О.В. Белозерова на итоговом заседании правления ОАО "РЖД" // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 7-16.
3. Липидус Б.М. Об основных направлениях научных исследований в интересах опережающего развития ОАО "РЖД" и их приоритизации // Железнодорожный транспорт. 2021. № 11. С. 22-29.
4. Липидус Б.М., Мишарин А.С., Махутов Н.А. и др. О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2050 года // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2017. № 2. С. 1-20.
5. Бородин А.Ф., Панин В.В., Лаханкин Е.А. и др. Повышение и использование перевозочной мощности полигонов сети: эффективные стратегия и тактика // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 8-16.
6. Правдин Н.В., Дыканюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. М.: Общество с ограниченной ответственностью Центр "Транспорт", 1987. 247 с.
7. Осьминин А.Т. Научное решение проблем перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 12-17.
8. Осьминин А.Т., Белозерова И.Г. Совершенствование системы планирования перевозок грузов // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 17-21.
9. Краковский Ю.М., Домбровский И.А. Прогнозирование грузооборота дороги на основе статистической и экспертной информации // Вестник стипендиатов DAAD. 2013. № 1(10). С. 48-54.
10. Бутыркин А.Я., Куликова Е.Б., Мадяр О.Н. Модели прогнозирования пассажирских перевозок на железнодорожном и авиационном транспорте // Наука и техника транспорта. 2021. № 1. С. 19-27.
11. Бодюл В.И. Математическая модель распределения вагонного парка по железным дорогам в условиях неравномерности грузовых перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 3. С. 3-9.
12. Сотников Е.А., Шенфельд К.П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. 2011. №5. С. 3-9.
13. Ульяницкий Е.М., Скляров В.Н. Моделирование процессов управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 55 2003. № 6. С. 39-42.
14. Максимей И.В., Сукач Э.И., Гируц П.В., Ерофеева Э.А. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети // Математические машины и системы. 2008. № 4. С. 147-153.
15. Ашуров А.М. Прогноз и ретроспективное диагностирование тенденций изменения параметров рынка услуг

железнодорожного транспорта // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2018. Т. 2. № 4(44). С. 54-63.

16. *Портнова О. Ю.* Построение и исследование математической модели обеспечения вагонами промышленных предприятий // Транспорт Урала. 2013. № 1(36). С. 60-67.

17. *Белозерова И.Г.* Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 372-379.

18. *Маловецкая Е.В., Большаков Р.С.* Оценка особенностей колебаний вагонопотоков с использованием математических моделей прогноза на основе временного ряда // Наука и техника транспорта. 2021. № 3. С. 32-39.

19. *Король Р.Г., Балалаев А.С.* Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока // Транспорт Урала. 2014. № 3(42). С. 53-57.

20. *Маловецкая Е.В., Большаков Р.С.* Особенности применения временных рядов для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 35-40.

21. *Маловецкая Е.В.* Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 3(71). С. 171-178.

22. *Максимей И.В., Сукач Е.И., Гируц П.В.* Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона // DataRecording, Storage&Processing. 2008. Vol. 10. № 1. P. 49-58.

23. *Рахмангулов А.Н., Тянь Ю.* Исследование методов "BIG DATA" для прогнозирования параметров транспортных потоков //

Отчет о НИР № Ор-15-37-51307\15 от 10.08.2015 (Российский Фонд Фундаментальных Исследований).

24. *Козлов П.А., Пермикин В.Ю., Колокольников В.С.* Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 3-6.

25. *Хэйт Ф.* Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1996. 287 с.

26. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. М.: Наука, 1986.

27. *Портнова О.Ю.* Построение и исследование математической модели обеспечения вагонами промышленных предприятий // Транспорт Урала. 2013. № 1(36). С. 60-67.

28. *Король Р.Г.* Обоснование математического аппарата для моделирования работы железнодорожной станции во взаимодействии с портом // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в 21 веке : труды всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. А. Ф. Серенко. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. Т. 2. С. 161-170.

29. *Сорочкина И.С., Числов О.Н.* Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 2. С. 115-120.

30. *Мазуренко О.О., Кудряшов А.В.* Имитационная модель работы железнодорожного направления для исследования вариантов организации грузовых вагонопотоков в оперативных условиях // Транспортные системы и технологии перевозок. 2012. №3. С. 50-55.

31. *Пехтерев Ф.С.* Обоснование долгосрочных перспектив объемов перевозок грузов железнодорожным транспортом с использованием межотраслевых балансов // Экономика железных дорог. 2013. № 12. С. 23-30.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF ARIMA MODELS IN BUILDING FORECAST VALUES OF CAR-FLOWS

Ekaterina V. Malovetskaya, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia, katerina8119@mail.ru

Anna K. Mozalevskaya, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia, Mozalevskay@mail.ru

Abstract

The current condition of developments in the field of estimating the unevenness of railway transportation in the field of solving the problems of efficiency of the organization of the transportation process with the use of landfill technologies is considered. Studying the problems of irregularities in the flow of cars, identifying the differences between unavoidable fluctuations from congestion or interruptions initiated by improper modes of movement with the need to eliminate, the creation of appropriate mechanisms to reduce unevenness can significantly optimize infrastructure use. The use of mathematical models of various kinds for formation of models of the forecast of change of car flows on railways is estimated. In particular, the method of time series allows you to build predictive models based on an array of data on car traffic. A comparative review of methods and means of forming forecast models of changes in car flows at the junctions of railways operating in a single technological space. The use of time series as a mathematical apparatus for constructing simulation models for forecasting wagon fluctuations and loading is estimated. Prospects for the use of simulation modeling as a tool for estimating the fluctuations of wagon flows at the junctions of railways with a single control center are considered. On the basis of the conducted analysis a number of directions of expansion of the existing methodological base of construction of simulation models of railway transportations is offered.

Keywords: forecasting of transport car traffic, mathematical model, time series, system approach, non-uniformity of car traffic, predictive analysis, forecast model, mathematical statistics, simulation model, linear and dynamic programming, performance indicators, theory of large systems.

References

1. The strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 was APPROVED by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 № 877-r.
2. O. V. Belozеров (2021) BELOZEROV at the final meeting of the board of Russian Railways. *Railway transport*. No. 3. P. 7-16.
3. B. M. Lapidus (2021) On the main directions of scientific research in the interests of the advanced development of Russian Railways and their prioritization. *Railway transport*. No. 11. P. 22-29.

4. B. M. Lapidus, A. S. Misharin, N. A. Makhutov et al. (2017) On the scientific platform for the development strategy of railway transport in Russia until 2050. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. No. 2. P. 1-20.
5. A.F. Borodin, V.V. Panin, E.A. Lakhankin et al. (2022) Increasing and using the transportation capacity of the network polygons: effective strategy and tactics. *Zheleznodorozhny transport*. No. 7. P. 8-16.
6. N.V. Pravdin, M.L. Dykanyuk, and V.Ya. Negrey (1987) Forecasting cargo flows. Moscow: Limited Liability Company Center "Transport". 247 p.
7. A. T. Osminin (2018) Scientific solution of the problems of the transportation process. *Railway transport*. No. 12. P. 12-17.
8. A. T. Osminin, I. G. Belozherova (2020) Improving the planning system for cargo transportation. *Zheleznodorozhny transport*. No. 3. P. 17-21.
9. Yu. M. Krakovsky, I. A. Dombrovsky (2013) Forecasting the freight turnover of the road based on statistical and expert information. *Bulletin of DAAD Fellows*. No. 1(10). P. 48-54.
10. A. Ya. Butyrkin, E. B. Kulikova, and O. N. Madyar (2021) Models for predicting passenger traffic in railway and air transport. *Science and Technology of Transport*. No. 1. P. 19-27.
11. V.I. Bodyul (2006) Mathematical model of the distribution of the rolling stock on the railways in the conditions of uneven freight traffic. *Vestnik VNIIZhT*. No. 3. P. 3 - 9.
12. E.A. Sotnikov, K.P. Shenfeld (2011) Irregularity of freight traffic in modern conditions and its impact on the required throughput capacity of sections. *Vestnik VNIIZhT*. No. 5. P. 3-9.
13. E.M. Ulyanitsky, V.N. Sklyarov (2003) Modeling of control processes of car flows in railway transport. *Bulletin of VNIIZhT*. № 6. P. 39-42.
14. I. V. Maksimey, E. I. Sukach, P. V. Giruts, E. A. Erofeeva (2008) Simulation modeling of the probabilistic characteristics of the functioning of the railway network. *Mathematical machines and systems*. No. 4. P. 147-153.
15. A. M. Ashurov (2018) Forecast and retrospective diagnosis of trends in changes in the parameters of the railway transport services market. *Polytechnic Bulletin. Series: Intellect. Innovation. Investments*. Vol. 2. No. 4 (44). P. 54-63.
16. O. Yu. Portnova (2013) Construction and study of a mathematical model for providing wagons for industrial enterprises. *Transport of the Urals*. No. 1 (36). P. 60-67.
17. I. G. Belozherova (2019) Modeling the planned loading according to various scenarios. *Bulletin of the Petersburg University of Communications*. Vol. 16. No. 3. P. 372-379.
18. E.V. Malovetskaya, R.S. Bolshakov, R.S. Bolshakov (2021) Evaluation of the peculiarities of fluctuations in car flows using mathematical forecast models based on the time series. *Science and Technology of Transport*. No. 3. P. 32-39.
19. R. G. Korol, A. S. Balalaev (2014) Simulation modeling of the operation of a port railway station with a probabilistic-statistical approach to changing the parameters of the incoming car traffic. *Transport of the Urals*. No. 3 (42). P. 53-57.
20. E.V. Malovetskaya, R.S. Bolshakov (2021) Features of the use of time series for assessing the fluctuations of car flows at railway junction points. *T-Comm*. Vol. 15. No. 1. P. 35-40.
21. E. V. Malovetskaya (2021) Application of the principles of system modeling for building predictive models of car flows. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. No. 3(71). P. 171-178.
22. I. V. Maksimey, E. I. Sukach, P. V. Giruts (2008) Using simulation to find the integral maximum flow in the transport network of the region. *DataRecording, Storage&Processing*. Vol. 10. No. 1. P. 49-58.
23. A.N. Rakhmangulov, Y. Tian (2015) Study of "BIG DATA" methods for predicting traffic flow parameters. Research report No. Or-15-37-51307. 15 dated 10.08.2015 (Russian Foundation for Basic Research).
24. P. A. Kozlov, V. Yu. Permikin, V. S. Kolokolnikov (2013) Automated construction of simulation models of large transport facilities. *Transport of the Urals*. No. 2 (37). P. 3-6.
25. F. Hayt (1996) Mathematical theory of traffic flows. Moscow: Mir. 287 p.
26. V.G. Karmanov (1986). Mathematical programming. Moscow: Nauka.
27. O. Yu. Portnova (2013) Construction and study of a mathematical model for providing wagons for industrial enterprises. *Transport of the Urals*. No. 1 (36). P. 60-67.
28. R. G. Korol (2013) Substantiation of the mathematical apparatus for modeling the operation of a railway station in cooperation with a port. youth scientific-practical. conf. with international participation / Ed. A. F. Serenko. Khabarovsk: Publishing House of the Far East State University of Railway Engineering. Vol. 2. P. 161-170.
29. I. S. Sorochkina, O. N. Chislov (2014) Methods of system analysis and simulation modeling in the work of industrial railway transport enterprises. *Proceedings of the Rostov State University of Communications*. No. 2. P. 115-120.
30. O. O. Mazurenko, A. V. Kudryashov (2012) Simulation model of the railway direction for the study of options for organizing freight car traffic in operational conditions. *Transport systems and transportation technologies*. No.3. P. 50-55.
31. F. S. Pekhterev (2013). Substantiation of long-term prospects for the volume of cargo transportation by rail using interbranch balances. *Economics of Railways*. No. 12. P. 23-30.

Information about authors:

Ekaterina V. Malovetskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia
Anna K. Mozalevskaya, Applicant, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia

MATHEMATICAL MODELS FOR TELECOMMUNICATION WORKFORCE MANAGEMENT

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-42-48

Manuscript received 05 December 2022;
Accepted 12 January 2023

Michail Fenomenov,
R&D Center Argus Technical director, St. Petersburg, Russia,
m.fenomenov@argustelecom.ru

Lev Goldstein,
Mathematical Laboratory LNMO, St. Petersburg, Russia,
lg090107@gmail.com

Keywords: IT-landscape of a telecom operator, workforce management WFM, key performance indicators KPI, probabilistic characteristics, deep machine learning ML, BSS/OSS systems

The article is devoted to the problems of advanced workforce management systems **WFM (Workforce Management)** of post-NGN telecommunication operators, a formalized approach to the description of extended **WFM** functionality and mathematical **WFM** models are discussed. The proposed approach allows to develop new **WFM** tools for telecommunication operators to increase their performance, to manage more effectively the work schedules of engineering employees of the company, visit customer sites, and control the workload of engineers in real-time. **Workforce Management systems (WFM)** of Next Generation Networks (**NGN**) are becoming more and more important. Compared to the routine distribution of requests between telephone technicians in the repair bureau of the old Public Switched Telephone Network (**PSTN**) in the last century, the modern **WFM** system operates with a disproportionately large set of functions, a wide range of professional competencies and key performance indicators (**KPIs**). In partnership with **WFM**, other new information technology tools (**IT-landscape**) of the telecommunication operator, elements of **BSS (Business Support Systems)**, human resource accounting (**HR**) software, enterprise resource planning (**ERP**) systems, other workforce planning, and management tools employee vacations, the timing of basic engineering operations at the operator's and customer's premises, and other support tools to optimize the performance of the required work by personnel, increase productivity and reduce costs.

Для цитирования:

Michail Fenomenov, Lev Goldstein. Математические модели построения систем WFM телекоммуникационных операторов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 42-48.

For citation:

Michail Fenomenov, Lev Goldstein (2023) Mathematical Models for Telecommunication Workforce Management . T-Comm, vol. 17, no.1, pp. 42-48. (in Russian)

Introduction

Workforce Management systems (WFM) of Next Generation Networks (NGN) are becoming more and more important. Compared to the routine distribution of requests between telephone technicians in the repair bureau of the old Public Switched Telephone Network (PSTN) in the last century, the modern WFM system operates with a disproportionately large set of functions, a wide range of professional competencies and key performance indicators (KPIs). In partnership with WFM, other new information technology tools (IT-landscape) of the telecommunications operator, elements of BSS (Business Support Systems), human resource accounting (HR) software, enterprise resource planning (ERP) systems, other workforce planning, and management tools employee vacations, the timing of basic engineering operations at the operator's and customer's premises, and other support tools to optimize the performance of the required work by personnel, increase productivity and reduce costs [1-3].

From an operational point of view, WFM makes daily and even hourly decisions on personnel asset management, allows you to identify the most qualified, trained, and suitable telecom engineers for a particular task, effectively engage them in this work, optimize work schedules and movements, and carefully control the work performed. And to do all this in an optimal way and in real-time. That is why the elements of a formalized approach to describing promising WFMs, mathematical models, and the study of probabilistic characteristics presented in the article are certainly relevant.

Workforce Management

Carrier Workforce Management System is a specialized software designed to manage and optimize the use of the Operator's staff. The business processes implemented by this system are aimed at supporting the operational activities in the network, including the organization and management of field workers: engineers, repair teams, installation technicians, subcontractors/agents, etc.; organization of the work of operators of Call-centers of a telecommunications company, geographically distributed work of employees at commercial units for the sale of connections to the network (SIM-cards), service packages, the offer of new telecommunication services, the contracts preparing, etc.

In the Telemanagement Forum's eTOM Telecommunications Process Map, workforce management processes lie at the intersection of the Support and Availability and Resource Management areas, i.e. Efficient workforce management is essential to support day-to-day customer order processing and network troubleshooting. The task of automating the management of working time invariably confronts the telecom operator when the number of engineers and tasks to be performed becomes such that "manual" management becomes difficult or even impossible [2]. In addition, telecommunications of the 21st century impose new tasks on WFM that are not at all typical for traditional PSTNs. Firstly, the reality of today's telecommunications is that a company's qualified engineers represent something more than human resources, and more than human capital - they represent a critical, intellectual asset of the Operator, a combination of both tangible and intangible assets - a creation of a modern NGN network. Secondly, and no less important is the growing cost of searching, maintaining, and providing improved working conditions for the specialists needed by the

Operator, as well as optimizing their workload and maximizing the efficiency of return. And thirdly, the growing demands for risk management, as well as regulatory and contractual obligations associated with modern HR management.

Figure 1 shows the interaction of WFM with other systems in the IT landscape, through which data is extracted, reformatted, allowed to calculate values, make decisions, create or qualify records, etc.

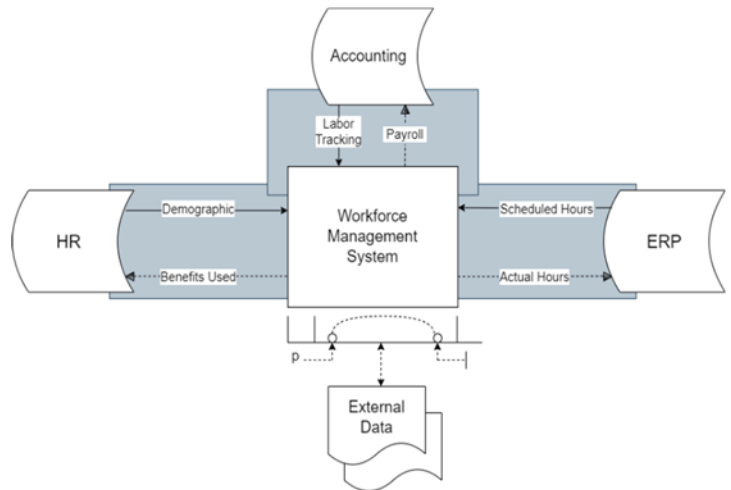


Fig. 1. WFM interfaces in IT-landscape

As can be seen in Figure 1, the implementation of a modern WFM system in the IT landscape of a telecom operator, data integration with other OSS/BSS subsystems, data exchange with ERP company resource planning systems, HR human resources, payroll, etc. are mandatory.

WFM synchronization with all these systems reduces manual data entry errors, significantly reduces the time required to exchange, download or retrieve data, simplifies and speeds up updates, and increases the productivity of modern telecom management. Accordingly, new models and methods for building the next generation WFM and integrating WFM as part of the IT landscape of post-NGN networks are needed.

Evolution of mathematical models of network management

Traditionally, the main probabilistic characteristics of the operational management of communication networks were considered to be the following two: the intensity of the flow of applications to the operational personnel of the network λ and the intensity of servicing these applications μ [2, 14,17].

The intensity of the flow of applications to the operating personnel λ (1/hour) is understood as the number of applications per unit of time to the engineering services of the Telco company for the repair, installation, and modernization of telecommunications equipment. In the context of this article, it is important to emphasize that the intensity of the flow of these applications has never been constant.

The non-stationarity of the flow of service requests was due to certain situations in the network: regular repair and maintenance work, commissioning of new switching nodes and stations and the corresponding commissioning, laying and modernization of linear cable structures, construction of base stations, commissioning of new services, etc.

The same can be said about the time of servicing orders by the engineering staff of the Telco. The service time for one requirement T_b is a random variable that can vary over a wide range. A random variable is fully characterized by a distribution law. In practice, most often they accept the hypothesis of an exponential distribution of service time, which occurs when the distribution density sharply decreases with increasing time t . For example, when the bulk of the requirements is served quickly, long-term service is rare. With an exponential distribution of service time, the probability of the event that the service time will last no more than t is equal to

$$P_{\text{об}}(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

The average service time $1/\mu$ is one of the most important characteristics of service devices, which determines the throughput of the entire system.

The load factor of engineering personnel with requirements r is the most essential WFM parameter of a telecommunications operator, which determines the value of μ . With an increase in the load factor of engineering staff R , the network maintenance costs decrease, but at the same time, quality indicators deteriorate, and hence the operator's competitiveness. Optimal management of personnel work allows you to reduce costs and not worsen quality indicators. The calculation of the number of operational personnel and the organization of work of the repair bureau (determination of the value of μ) was carried out for certain time intervals of the operation of the communication network, within which the flow parameter λ can be taken constantly.

Figure 2 shows a continuous flow function $\lambda(t) \geq 0$, the average value of which can be considered constant over sufficiently large segments of the time axis $[t_n, t_{n+1}]$.

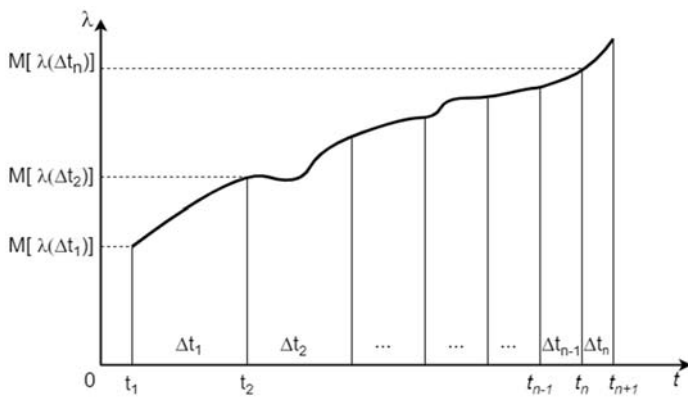


Fig. 2. Partitioning the demand flow function into intervals

The problem lies in the size of these segments, i.e. the duration of the intervals $[t_n, t_{n+1}]$, on which the values of $\lambda(t)$ can be considered fixed. In ancient times, in the era of the public switched telephone network (PSTN), when the life of the exchange was calculated for 20+ years, this period was 10-15 years based on the development plan for the communication network. With the advent of mobile communications and dial-up Internet access, this interval has been reduced to 2-3 years, and now, when switching to 4G/5G networks, it is generally measured not in years, but in months [4,5].

Let us describe this problem in a slightly more formalized way. The figures bounded by the graph of the function $\lambda(t)$, the abscissa axis, and the straight lines t_1, t_2, \dots, t_n parallel to the ordinate axis (Fig. 2) are curvilinear trapezoids. From a geometric point of view, the definite integrals of the non-negative function $\lambda(t)$ in the intervals $[t_n, t_{n+1}]$ are numerically equal to the areas of these curvilinear trapezoids. We need to take the value of the flow on each segment constant and equal to the mathematical expectation λ_n of the flow function $\lambda(t)$ on the interval $[t_n, t_{n+1}]$. The reliability Δ of such an assumption is determined by the difference between the area of a rectangle with a base $[t_n, t_{n+1}]$ in Figure 2 and the area of a curvilinear trapezoid with the same base, determined by a certain integral

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \lambda(t) dt$$

From a mathematical point of view, the reliability of the decisions made is determined by the difference between the areas of curvilinear trapezoids and the area of the stepped figure in Figure 2, which in turn depends on the number of partitioning intervals N , most likely, unequal segments. The segments of the partition are chosen so that within each segment it is possible to approximately consider the flow parameter to be constant, taking into account the form of the graph of the flow function $\lambda(t)$ in Figure 2.

It is this non-uniformity of the intervals $[t_n, t_{n+1}]$, the values of which varied from one to two decades in the PSTN era to one to two months during the transition to 5G, was discussed above.

Let us consider the re(e)volution of mathematical models and methods for constructing the IT landscape of a telecommunications company, including WFM, which is caused by these processes of transition to 5G networks and, in particular, by an order of magnitude decrease in the durations of $[t_n, t_{n+1}]$ intervals.

On Figure 3 presents two approaches to the organization of Telco management, which we can define with a certain degree of conventionality as stationary planning by methods of queuing theory (line 1) and dynamic control by methods of artificial neural networks (line 2). Both of these approaches are present in varying proportions today in the management of communication networks. The balance between these two approaches changes in this way as the parameter x increases, the inverse of the stability interval $[t_n, t_{n+1}]$ $x=1/(t_{n+1} - t_n)$, increasing in a new way each time as the complex operational management at the next stage of development of telecommunications, as shown in Figure 3.

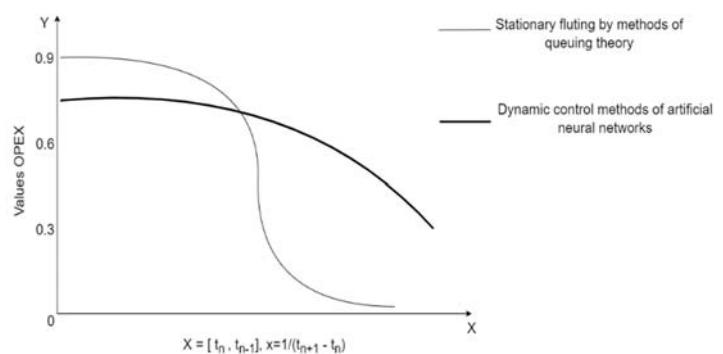


Fig. 3. Paradigm shift in post-NGN network management modeling

As networks become more complex and transition to fifth-generation heterogeneous networks, the efficiency of stationary network control planning in general [AG doctoral], and WFM in particular, is gradually decreasing, while new dynamic control approaches based, in particular, on artificial neural networks seem to be very promising, which is discussed in more detail below in the corresponding section of the article. But first, let's consider the approach proposed by the authors to the calculation of the probabilistic-characteristics of WFM.

Probabilistic characteristics of WFM

It should be noted that many software companies are working in the field of WFM today, many materials are published on practical WFM engineering methods using artificial intelligence models, deep machine learning, neural networks, and other robust methods of computer science [4]. Some of these methods will be considered in the third part of this work.

The main goal of this section is different. It consists of the research and development of a mathematical model of the probabilistic characteristics of WFM processes for super-complex high-tech tasks that are carried out by WFM systems of Telco operators. Many publications are also devoted to similar studies and mathematical models. It deals with mathematical models of route optimization, scheduling, finding the shortest path on a graph, statistical analysis, mathematical planning methods, etc. Some of these publications, which are closest to this study, are listed in the list of references for the article.

We emphasize that the distinctive feature of this study is that it is focused on WFM tasks in high-tech companies. The production processes performed by postmen, pizza delivery men, and call center operators are easier to formalize and, therefore, are managed differently than the production processes performed, for example, by engineers from Rostelecom or Megafon, who perform different tasks at their facilities in different cases. connecting the Internet, TV, building and setting up a WiFi network in a private home or office, installing Private LTE base stations, etc.

Under these conditions, the theoretical foundations of the proposed model are based on the following assumptions. The production cycle consists of three phases. Phase 1 is the planning and preparation in the WFM system of the *i*-th variant of the execution of the *j*-th task by the engineering staff of the company with the mathematical expectation of the execution time $M[t_{ij}]$ and the standard deviation of this time σ_{ij} . We emphasize that, unlike simple WFM systems (mail, delivery of goods, Call-center operators, etc.), the formation of a variant of execution in our case of complex high-tech services, this time can be very significant and exceed the time of the work itself at the customer's facility (for example, designing a local office network, calculation, and purchase of equipment at the facility, etc.).

Works at the customer's site, including installation and configuration of equipment and/or maintenance, repairs, etc., are performed in phase 2 with probabilistic characteristics $M[t_{2ij}]$ and σ_{2ij} , respectively.

Phase 3 is the formation and analysis of a report on the work performed, entering the relevant into the Inventory system, evaluating the work of engineering personnel, transferring the equipment of the facility to warranty / post-warranty maintenance, etc. We denote the probabilistic-temporal characteristics of this phase by $M[t_{3ij}]$ and σ_{3ij} , respectively.

The mathematical expectation of the time spent on this option *i* is determined by the formula

$$M[T_{ij}] = \sum_{n=1}^3 M[t_{nij}] \tag{1}$$

Of course, a more significant character, in this case, is not the average execution time of variant *i*, but the distribution function of a random variable (probability density), which is not very difficult to obtain under the assumption that the execution times of phases 1-3 are independent random variables obeying the normal law distributions with parameters *t* and σ :

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^3 \sigma_{nij}^2} \tag{2}$$

Depending on the nature of the set of tasks $j = 1, 2, \dots, K$, performed by engineering personnel at customer sites in the *i*-th version of WFM, the random variable of the cycle time T_{ji} can obey the normal distribution law, exponential distribution, uniform distribution or Rayleigh distribution.

For a normal distribution, the probability that the cycle duration does not exceed a given value τ is expressed by the known relation [6]

$$P\{T_{ij} \leq \tau\} = \frac{1}{2} \left[1 + \phi \left(\frac{\tau - M[T_{ij}]}{\sigma_{ij} \sqrt{2}} \right) \right] \tag{3}$$

where $\phi(x)$ – Laplace function

$$\phi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt \tag{4}$$

From formula (3) we obtain that for $M[T_{ji}] = \tau$ the probability

$$P\{T_{ij} \leq \tau\} = \frac{1}{2} \tag{5}$$

it is obvious that to calculate the efficiency of the WFM scenario *i* of performing $j=1,2,\dots, K$ tasks, checking the restriction of only the mathematical expectation of the cycle time to exceed the boundary cycle time τ is insufficient. It is also necessary to take into consideration the distribution function, or at least the second moment of the distribution - the standard deviation.

But such a calculation for each variant *i* is very time-consuming and excludes its implementation in real-time, when, for example, WFM tasks are handled by Artificial Intelligence.

Therefore, it is proposed to keep the analysis of *i*-variants based on the mathematical expectation $M[T_{ji}]$, but instead of the boundary time of its execution τ , choose another, smaller value, which we denote by τ_g guaranteed time of the working cycle.

The value of τ_g is calculated in such a way that it corresponds to a practically acceptable probability *P*. The exact value depends on the specific application so that the probability P_g , for example, would be at least 0.9.

The formula for τ_g is found from the following considerations. Solving the equation

$$P_g = P\{T_{ij} \leq \tau_g\} = \frac{1}{2} \left[1 + \phi \left(\frac{\tau_g - M[T_{ji}]}{\sigma_{ij} \sqrt{2}} \right) \right] \tag{6}$$

for τ_g we get

$$\tau_g = M[T_{ji}] + \alpha\sigma_{ij} \tag{7}$$

here α – guarantee coefficient – is calculated by the formula

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{\phi(2P_g - 1)} \tag{8}$$

Using this technique, it is relatively easy to calculate the optimal i -th WFM strategy from the set of possible strategies for each operation interval $[t_n, t_{n+1}]$. Such an engineering technique has been implemented and successfully operates in the WFM system of the Argus platform, for example. But back to Figure 2 of this article [11, 12].

It is clear, that the effectiveness of the proposed mathematical model essentially depends on the nature of the curve $\lambda(t)$ and the duration of the interval $[t_n, t_{n+1}]$. Relatively speaking, it is possible to calculate the optimal WFM strategy for a year, for a quarter, for a month, and finally, to recalculate and change this strategy in the middle of the working week or, even worse, during the working day, it can hardly be appropriate.

Then we should return to Figure 3 and the consideration made about the second curve in this figure

Neural networks in the Workforce Management

In recent decades, interest in neural networks has increased dramatically, this is largely due to the opportunities that have arisen with the widespread use of high-performance and relatively cheap computers. The growth of computing power made it possible to put into practice the ideas expressed by the ideologues of the study of artificial intelligence back in the 90s of the XX century [9]. One of these ideas is the Hopfield neural network - a fully connected neural network with a symmetric connection matrix, the block diagram of which is shown in Figure 4.

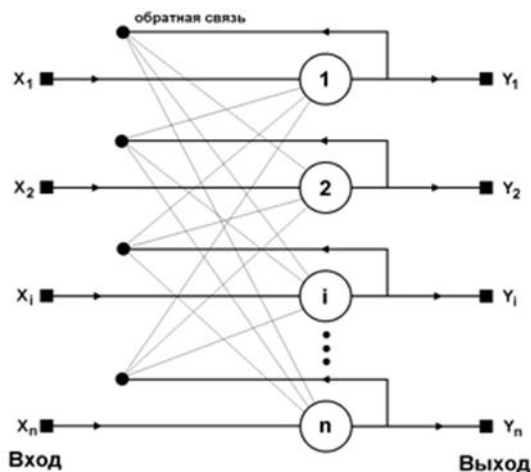


Fig. 4. Hopfield neural network block diagram

In the process of operation, the dynamics of such networks converge to one of the equilibrium positions. These equilibrium positions are local minima of a function called the energy of the network (in the simplest case, local minima of a negative definite quadratic form on an n -dimensional cube). The network can be used to solve some WFM optimization problems due to its associ-

ativity, as well as to reduce the Lyapunov function during the network operation [13]. This allows you to increase the quality of work of the company's engineers, ensure automatic adjustment of optimal routes for servicing facilities, and monitor the movements of engineering and technical performers in real-time or using GPS track recording.

A more detailed discussion of WFM optimization using the Hopfield neural network is beyond the scope of this article. Here we will consider the application of the apparatus of neural networks for Phase 3 of the WFM process.

Phase 3 of the WFM process discussed above is the analysis of reports on the work performed, entering the relevant ones into the technical accounting system, evaluating the work of engineering personnel, calculating KPIs, checking and saving a photo report from the facility, transferring the facility's equipment to warranty/post-warranty maintenance, appropriate documentation of the repaired and/or newly installed telecommunications equipment.

All these functionalities of the system help to reduce customer service time, i.e. reduce the time for the selection of performers and the time of the visit when calling the technical support dispatcher.

An effective automated tool for processing reports from engineering personnel of a telecommunications operator from customer facilities is a software subsystem that is part of WFM and is based on an artificial neural network for analyzing reports S_{ao} .

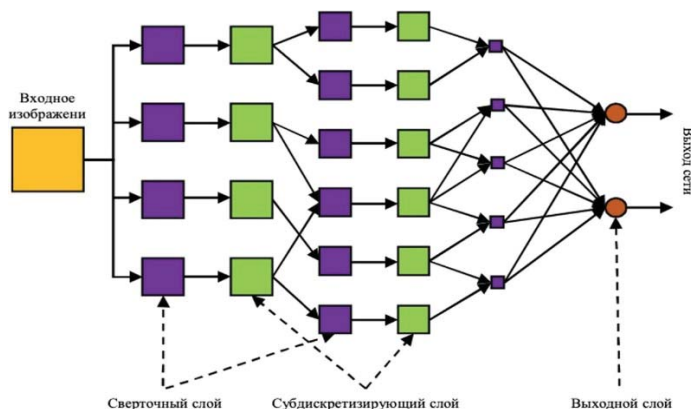


Fig. 5. Fragment of a convolutional neural network for analyzing reports

During the operation of the report analysis network S_{ao} , a purposeful change in the parameters of neurons (weights of inputs w_i and thresholds T_j) is carried out, to implement the output function of the integral assessment of the report on the performance of work at the customer's facility, the function $F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Here x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) is a set of assessments of the performance of one or another KPI based on the submitted report.

To manage and control the work of engineering personnel in the field, an act signed by the client, a work order, passport data of the equipment installed at the subscriber, and another 'selfie' from the facility, are attached to each report on the work performed, are used. a photo of the employee at the client or at another place of work, which should also be attached to the report on the work done (Fig. 6).

The fact is that employees of a telecommunications company need to wear a uniform. It helps to identify their ownership, which is important not only from a marketing point of view but also from the point of view of customer safety.



Fig. 6. Photo reports from objects

This is also why, after completing the work, the engineer sends a WhatsApp report to the office, in which, in addition to indicating the work done, the equipment installed, the time of arrival and departure, photos from the place of work are attached, examples of which are given here.

Starting from 2021, in connection with the COVID-19 pandemic, the mandatory wearing of a mask has been added to the regulations for the work of engineers of a telecommunications company at customer sites. The fulfillment of this new requirement by analyzing photographs from electronic order fulfillment reports is verified by the neural network of S_{ao} .

Conclusion

The models and approaches proposed in the article allow the WFM tools of a telecommunications operator to effectively perform their functions, develop and manage the work schedules of engineering employees of the company, visit customer sites, distribute the load on employees with a given performance and add any related events (vacations, days off, sick leave), plan and control the workload of engineers in real-time, and generate and store reports on various indicators with the possibility of accruing bonuses based on the results of work performed.

From a strategic point of view, the value of the proposed approach to the operation of a modern WFM system lies in its interdisciplinary thinking, which is based both on traditional methods for calculating probabilistic and temporal characteristics, and on models of business intelligence BI, artificial intelligence AI, machine learning ML. As a result of this, and in contrast to human

resource (HR) management systems, financial and marketing systems, and other information systems of the IT landscape of the Telecom Operator, the approach to WFM proposed in the article considers the engineering and technical staff as the main integrated investments of the Operator, which must be effectively managed in network-wide to ensure maximum performance, maximum return on this investment.

This allows the Operator to introduce new network technologies and services more efficiently and effectively, to carry out the strategic development of its NGN and post-NGN networks using the engineering and technical staff available to the Operator, increasing key performance indicators (KPIs) through advanced WFM system.

References

1. Goldshtein A.B. (2018) Two approaches for telecommunication networks management. *T-Comm*. 2018. Vol. 12. No 3. P. 57-63.
2. De Bruecker P, Van den Bergh J, Beliën J, Demeulemeester E (2015) Workforce planning incorporating skills: state of the art. *Eur J Oper Res*. No. 243(1). P. 1-16.
3. Nikhat Parveen, Saketh Ranga, Gouni Nishanth, Chaluvadi Sai Abhijith, Athmakur Harish Kumar Reddy (2021) Work Force Management System Using Face Recognition. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. Vol. 12. No. 9. P. 56-61.
4. Ibrahim Zeki Akyurt, Yusuf Kuvvetli, Muhammet Deveci, Harish Garg, Mert Yuzsever (2022) A new mathematical model for determining optimal workforce planning of pilots in an airline company. *Complex & Intelligent Systems*. No. 8. P. 429-441. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00386>.
5. Cao H, Hu J, Jiang C, Kumar T, Li T-H, Liu Y, Lu Y, et al. (2011) OnTheMark: Integrated stochastic resource planning of human capital supply chains. *Interfaces*. No. 41(5). P. 414-435.
6. Willis G, Cave S, Kunc M (2018) Strategic workforce planning in healthcare: a multi-methodology approach. *Eur J Oper Res*. No. 267(1). P. 250-263.
7. Goldstein A., Chumachkova E., Nikulin V. (2013) Applied Geometry for Workforce Management. *Technologies and means of communication*. No. 2. P. 50- .
8. Sheldon M. Ross (2014) Introduction to Probability Models. Eleventh Edition. Academic Press is an imprint of Elsevier.
9. Llort, N. & García, Amaia & Martínez-Costa, Carme & Mateo, Manuel (2018). A decision support system and a mathematical model for strategic workforce planning in consultancies. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 10.1007/s10696-018-9321-2.
10. Ross Sparkman (2023) Strategic Workforce Planning: Developing Optimized Talent Strategies for Future Growth. Kogan Page; 2nd edition.
11. Nikulin V.V., Petrovsky N.O., Fenomenov M.A. (2020) WFM as an employee experience management tool in the contact center. *Vestnik svyazi*, No. 12. P. 11-14.
12. Carmen R., Defraeye M., Van Nieuwenhuysse I. (2015) A decision support system for capacity planning in emergency departments. *International Journal of Simulation Modelling*. Vol. 14. No. 2. P. 299-312.
13. Tanya Moore and Eric Bokelberg How IBM Incorporates Artificial Intelligence into Strategic Workforce Planning <https://www.shrm.org/executive/resources/people-strategy-journal/Fall2019/Pages/moore-bokelberg-feature.aspx>
14. Jun Woo Kima, Sang Chan Parka (2007) Flexible Workforce Management System for Call Center: A case study of public sector. *Asia Pacific Management Review*. No. 12(6). P. 338-346.
15. Workforce asset management book of knowledge / Lisa Diselkamp, editor. John Wiley & Sons, Inc. 2013.
16. K. B. Priya Iyer, Fernandes Jeysree Felix. A Cost Effective Mathematical Model for Strategic Workforce Planning. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* ISSN: 2249-8958 (Online), Vol. 9 Issue 2, December, 2019.
17. M. Sivasundari, K. Suryaprakasa Rao, R.Raju (2019) Production, Capacity and Workforce Planning: A Mathematical Model Approach. *Appl. Math. Inf. Sci*. No. 13. No. 3. P. 369-382.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ WFM ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ОПЕРАТОРОВ

Михаил Феноменов, научно-технический центр АРГУС, г. Санкт-Петербург, Россия, m.fenomenov@argustelecom.ru
Лев Гольдштейн, математическая лаборатория ЛНМО, г. Санкт-Петербург, Россия, lg090107@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена проблематике перспективных систем управления персоналом WFM (Workforce Management) телекоммуникационных операторов пост-NGN, предложен формализованный подход к описанию расширенного функционала WFM, предложены функциональная и математическая модели WFM для перспективных инфокоммуникационных сетей операторов связи. Предложенный подход позволяет разрабатывать новые инженерные инструменты WFM, повышать их производительность, более эффективно управлять графиками работы инженерно-технического персонала операторской компании, пусконаладочными работами на объектах заказчиков, а также планировать, оптимизировать и контролировать загрузку телекоммуникационных инженеров в режиме реального времени.

Ключевые слова: IT-ландшафт оператора связи, управление персоналом WFM, ключевые показатели эффективности KPI, вероятностно-временные характеристики ВВХ, глубокое машинное обучение DP, системы BSS/OSS.

Литература

1. Goldshtein A.B. Two approaches for telecommunication networks management // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 3. С. 57-63.
2. De Bruecker P, Van den Bergh J, Belien J, Demeulemeester E. Workforce planning incorporating skills: state of the art. Eur J Oper Res 243(1), 2015, pp. 1-16.
3. Nikhat Parveen, Saketh Ranga, Gouni Nishanth, Chaluvadi Sai Abhijith, Athmakur Harish Kumar Reddy. Work Force Management System Using Face Recognition. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. Vol.12 No.9, 2021, pp. 56-61.
4. Ibrahim Zeki Akyurt, Yusuf Kuvvetli, Muhammet Deveci, Harish Garg, Mert Yuzsever. A new mathematical model for determining optimal workforce planning of pilots in an airline company. Complex & Intelligent Systems, 2022, no. 8, pp. 429-441. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00386>.
5. Cao H, Hu J, Jiang C, Kumar T, Li T-H, Liu Y, Lu Y, et al. OnTheMark: Integrated stochastic resource planning of human capital supply chains. Interfaces, 2011. No. 41(5), pp. 414-435.
6. Willis G., Cave S., Kunc M. Strategic workforce planning in healthcare: a multi-methodology approach. Eur J Oper Res, 2018, no. 267(1), pp. 250-263.
7. Гольдштейн А., Чумачкова Е., Никулин В. Прикладная геометрия для Workforce Management // Технологии и средства связи. 2013. No 2. С. 50-51.
8. Sheldon M. Ross. Introduction to Probability Models. Eleventh Edition. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2014.
9. Llort N. & Garcia Amaia&Martinez-Costa, Carme& Mateo Manuel. A decision support system and a mathematical model for strategic workforce planning in consultancies. Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. 10.1007/s10696-018-9321-2.
10. Ross Sparkman. Strategic Workforce Planning: Developing Optimized Talent Strategies for Future Growth. Kogan Page; 2nd edition, 2023.
11. Никулин В.В., Петровский Н.О., Феноменов М.А. WFM как инструмент управления Employee Experience в контакт-центре // "Вестник связи", №12, 2020. С. 11-14.
12. Carmen R., Defraeye M., Van Nieuwenhuysse I. A decision support system for capacity planning in emergency departments, International Journal of Simulation Modelling, 2015. Vol. 14, No. 2, pp. 299-312.
13. Tanya Moore and Eric Bokelberg. How IBM Incorporates Artificial Intelligence into Strategic Workforce Planning <https://www.shrm.org/executive/resources/people-strategy-journal/Fall2019/Pages/moore-bokelberg-feature.aspx>
14. Jun Woo Kim, Sang Chan Park. Flexible Workforce Management System for Call Center: A case study of public sector. Asia Pacific Management Review, 2007, no. 12(6), pp. 338-346.
15. Workforce asset management book of knowledge / Lisa Disselkamp, editor. John Wiley & Sons, Inc. 2013.
16. K. B. Priya Iyer, Fernandes Jeysree Felix. A Cost Effective Mathematical Model for Strategic Workforce Planning. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958 (Online). Vol. 9. Issue-2, December, 2019.
17. M. Sivasundari, K. Suryaprakasa Rao, R.Raju. Production, Capacity and Workforce Planning: A Mathematical Model Approach. Appl. Math. Inf. Sci. 13, 2019. No. 3, pp. 369-382.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE OPENFLOW CONTROLLER IN A NETWORK WITH DIFFERENT LOADS

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-49-54

Denis O. Yakupov,
Povolzhskiy State University of Telecommunications
and Informatics, Samara, Russia, d.yakupov@psuti.ru

Manuscript received 11 December 2022;
Accepted 17 January 2023

Sergey V. Malakhov,
Povolzhskiy State University of Telecommunications and
Informatics, Samara, Russia, malakhov-sv@psuti.ru

Keywords: Software-Defined Network, OpenFlow
protocol, OpenDaylight, Cbench, controller
productivity

One of the main ideas of software-defined network is the creation of special software (OpenFlow controller), which allows you to separate the management of existing network equipment (routers and switches) without changing it. This software can run on a separate PC, which is managed by a network administrator. Therefore, this paper examines the performance of the OpenFlow controller. This article describes the OpenFlow OpenDaylight controller, and also defines its place in the network architecture of a software-defined network. The methodology of the conducted research of the experiment includes a description of the special Cbench software. In operation, Cbench was launched in two modes: the delay mode for sending subsequent packets and the maximum data transfer mode for measuring bandwidth. In delay mode, each switch sends one new packet to the emulated stream and waits for a response. After that, it sends the next packet and so on. The delay shows the time it takes for the controller to process an OpenFlow request under low load. In bandwidth mode, each switch sends requests until the buffer is full. Thus, this mode allows you to measure the maximum performance that the controller can handle. According to the presented methodology, experimental samples of the network were collected. The experiments are as follows: 1) when the switch distributes the load to the controllers and, 2) Cbench generates streams for each of the controllers separately. The mode of operation of the Cbench program is also changing. According to the results of the experiments, data is obtained on the number of packets processed by each controller under different conditions.

Information about authors:

Denis O. Yakupov, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Assistant of the Department of Software Engineering, Samara, Russia
Sergey V. Malakhov, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Samara, Russia

Для цитирования:

Якупов Д.О., Малахов С.В. Анализ эффективности контроллера OpenFlow в сети с разной нагрузкой // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 49-54.

For citation:

Yakupov D.O., Malakhov S.V. (2023). Analysis of the efficiency of the OpenFlow controller in a network with different loads. *T-Comm*, vol. 17, no.1, pp. 49-54. (in Russian)

Introduction

Currently, network architectures are becoming increasingly popular, which have separate levels of data representation (a comparison with the route table and a transaction of network packets from one port to another is performed) and for management (establishing the optimal route and forwarding data along selected routes). This architecture has many advantages due to an ordered algorithm that makes the data transfer process much easier. Data transmission is controlled by special software, which is a network software controller. The software introduces its own delays for data processing, being on the side of a separate server. Due to this, the task of studying the performance of the controller in software-defined network becomes the most relevant [1].

Trends in the development of modern infocommunication networks, such as the intensive growth of new network applications, the growth of the number and types of new network devices, lead to a significant increase in the volume of transmitted traffic. In this case, it becomes necessary to manage heterogeneous flows and provide - the required level of QoS (Quality of Service) quality of service when ensuring the security of processing the transmission of stream data. This leads to the fact that providers of large networks need to look for new network control mechanisms, with the ability to quickly configure networks.

Software-Defined Networking (SDN) and Network Function Virtualization (NFV) technologies with customizable software provide control over network management, and control is more intelligent and centralized. This makes the network more flexible, programmable, and innovative [2, 3].

The implementation of SDN entails the need to develop adequate models that allow you to quickly obtain accurate estimates of QoS parameters necessary at the stage of network design and further during operation in order to be able to quickly respond to changes in network requirements and network topology modification [4]. It should be noted that the issues of performance and scalability of SDN are still little investigated in terms of building analytical models. Simulation simulations and experiments on real networks have their advantages

Most of the work devoted to the study of the effectiveness of the SDN is aimed at developing simulation models and experimenting on real equipment. [5-7] presents mathematical models for evaluating the performance of controllers and switches under overload conditions. The OpenFlow-based SDN analytical model in [8,9] approximates the data plane as an open Jackson network with a controller modeled as a M/M/1 queue. [10] presents the SDN performance model based on the OpenFlow protocol with several OpenFlow switches, but this model is obtained with the assumption that the processed flows are the simplest, while the SDN controller incoming message processing performance is calculated based on the M/G/1 model. However, it is known that the flows generated by modern applications in the network are not Poisson, which requires considering the real properties (parameters) of traffic in the models used [11, 12].

The works [13, 14] present mathematical models for systems that process non-Poisson flows, but only the parameters of the functioning of individual sections of the SDN, and not the network, are considered.

The development of an analytical model of SDN as a G/G/1 system remains very relevant. The methodology presented in [10] is convenient to use to expand the application processing

model in the SDN when servicing non-Poisson flows based on the model of an arbitrary G/G/1 queue.

The following is an analytical model of the OpenFlow-based software-configurable network, since it is the most common, and such a model can be used as a basic model for other communication protocols in the SDN. As a request, a separate package, or a bundle of packages, or a stream is considered.

Packet traffic formed in the form of packet bursts is considered as processed flows, which most closely corresponds to the nature of formation of modern flows [15].

Like the approach, [10] analyzes separately the request receipt process and the procedure for forwarding requests through the switch and the OpenFlow controller, and then the system for forwarding requests to the SDN.

Theoretical information

The controller is a special server running on a special network environment, together with network software. The network environment simplifies the process of developing components, as well as combining them within a single project. It interacts with the equipment and makes it possible to monitor and manage the software-defined network in full. The network environment itself does not control the network, but only allows you to use an interface for special software that already could manage all the network functionality.

Currently, there is a variety of controllers used in software-defined networks. To conduct the experiment, the OpenDaylight controller was chosen.

Previously, network equipment was not controlled centrally – all settings were written individually for each gateway/matchmaker. And it suited almost everyone. However, with the advent of new cloud technologies, needs have changed and new ideas for organizing network management have been needed. One of these ideas was SDN (Software Defined Networking). The idea is that in a network based on it, network management is separate from data devices, which adds another layer of abstraction.

Based on this idea, another one was developed - NFV (Network Functions Virtualization), which closely intersects with the idea of SDN. NFV allows you to virtualize individual network functions that previously could only be implemented physically, for example, a firewall or IDS. That is, physically the user can be in Samara, and the firewall is overseas [16].

And then there is a transition to OpenDaylight. It is a platform for organizing the work of these technologies. Strictly speaking, this is not a ready-made solution, but a framework based on which interested companies and developers can build their products for SDN networks. Before describing OpenDaylight further, you need to get some idea of the structure of such networks. You can conditionally divide an SDN network into three layers:

- at the very top level are applications that are responsible for network and business logic and monitor/monitor network behavior. More complex solutions also combine cloud and NFV applications, and design network traffic according to the requirements of these applications;
- the second layer, in fact, is an abstraction layer - on it there is a separation of network management and data transmission;
- and finally, the last layer is the layer of data transmission devices. It is worth noting that these devices can be both physical and virtual.

OpenDaylight concentrates on the second layer of the SDN network and provides a set of RESTful APIs and an OSGi framework for upper-layer applications ("northern interface"), while implementing C&C protocols for data devices such as OpenFlow, BGP and SNMP ("southern interface"). In addition, it implements various managers - from topology manager to traffic forwarding manager.

The OpenDaylight kernel is written in Java, therefore, it can work on any system where JVM is available. In addition, this framework is extremely flexible and modular, which allows you to use only the capabilities that are necessary for a specific network.

In general, this is a rather promising direction, which, however, makes sense only for a large Enterprise sector, for example, for backbone providers.

Having studied the capabilities of the controller, we can say that OpenDaylight can process more than 500 thousand threads in one second, while saving time for processing one packet about 5 ms [17].

If you do not optimize the generated flows of the system in question, then the use of this architecture will be ineffective. Here, in addition to the OpenFlow controller, there are also third-party components that play an important role in the formation of delays. But, if you perform optimization at the very beginning, then the efficiency of using the OpenFlow controller can be increased significantly.

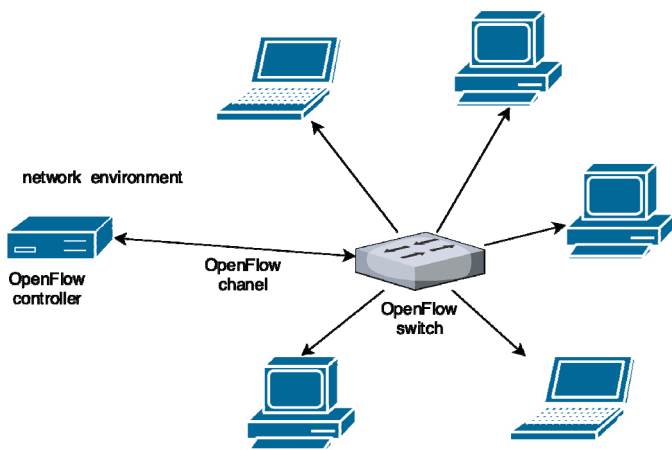


Fig. 1. SDN network architecture

Figure 1 shows a software-defined Open Flow network consisting of an OpenFlow controller, an OpenFlow switch, communicating over a communication channel.

Performance Study Methodology

With the help of special open source Cbench Security Detection software, it is possible to simulate several OpenFlow indicators to measure controller performance and any other parameters, including monitoring tools and maximum performance, detection, and control of incoming traffic, as well as outgoing traffic volumes [18], with a high level of packet verification.

Cbench will be used to measure controller performance. In this case, the number of threads per second that the controller can process will be indicated.

In software-defined network OpenFlow, the controller establishes and distributes traffic through OpenFlow switches. The distribution process may occur statically before the arrival of the packet (active distribution) or dynamically (reactive distribution) as part of the next process. The latter flow parameter is particularly sensitive as the flow slows down the first packet slightly. Once configured, the thread addressing state is cached on the OpenFlow switch so that the process is not repeated for subsequent packets in the same thread. OpenFlow switches also report cache and backup status indefinitely, after a specified timeout, or after a period of inactivity. The installation process, in which both streams are an integral part of the SDN, has been identified as the most likely source of bottlenecks.

The Cbench software measures the various performance parameters associated with the flow setup time. Cbench simulates a configurable number of OpenFlow switches so that they all connect to the same OpenFlow controller. Each simulated switch sends several new message streams to the OpenFlow controller, waits for the corresponding configuration response stream, and records the time difference between request and response.

Cbench supports two operating modes: delay mode and data transfer mode for bandwidth measurement. In delay mode, each switch sends one new packet to the emulated stream and waits for a response. After that, it sends the next packet and so on. The delay shows the time it takes for the controller to process an OpenFlow request under low load.

In bandwidth mode [19], each switch sends requests until the buffer is full. Thus, this mode allows you to measure the maximum performance that the controller can cope with.

Experimental studies

Below are experimental network diagrams, when Huawei S5720 distributes the load to controllers (Fig. 2) and is generated from the Cbench server for each controller OD-1, OD-2, OD-3 and OD-4 its flow (Fig. 3). Description of the main equipment:

- 1) four servers to install an OpenDaylight (OD) controller on each server;
- 2) a dedicated server for installing Cbench software;
- 3) Huawei S5720 switch for load sharing;
- 4) GigabitEthernet communication channels.

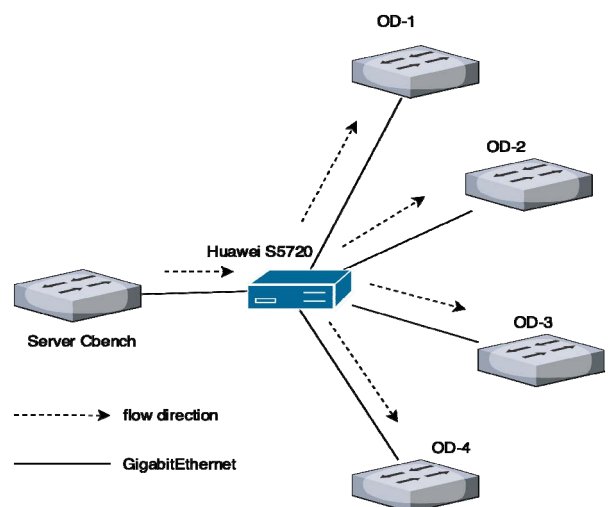


Fig. 2. Experimental network diagram, Cbench server generates one stream

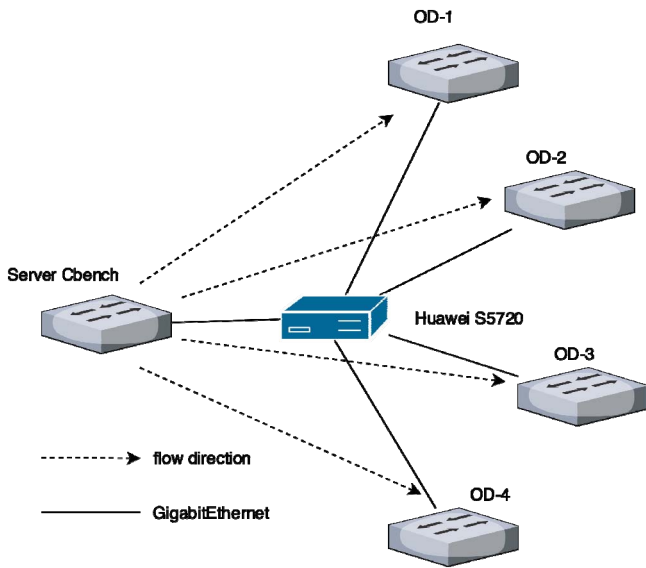


Fig. 3. Experimental network diagram, Cbench server generates four streams for each controller

Description of the experiment:

1. Maximum Performance Experiment. The number of threads is 1, 2, 4, 6 and 8. The stream is generated by Cbench on a dedicated server. The flow passes through the Huawei S5720 switch. On the switch, the load is distributed to 4 OpenDaylight controllers. Cbench runs with the «-t» option with maximum performance.

2. Experiment in delay mode. Cbench starts with the «-i» parameter with a delay between the switches being connected. The remaining parameters, as in the 1st experience.

3. Maximum Performance Experiment. The number of threads is 1, 2, 4, 6 and 8. From the dedicated server, threads are sent to each controller separately. At the same time, Huawei does not perform load balancing. Cbench runs with the «-t» option with maximum performance.

4. Experiment in delay mode. Cbench starts with the «-i» parameter with a delay between the switches being connected. The remaining parameters, as in the 3rd experience.

Results of the experiment

In order to correctly calculate the number of controllers at a certain load on the experimental network [20], you need to know the bandwidth for each controller.

A test result was obtained, which consists of 5 command runs with a certain number of studies. Each launch was carried out on 1, 2, 4, 6, 8 streams. The result shows testing to achieve maximum throughput performance (Figure 4).

The results clearly show that maximum performance is observed where the OpenDaylight controller processes 2 and 8 threads at once.

Test result for the delay time study (Figure 5).

The results clearly show that when sent from the OpenFlow switch to the controllers, the minimum delay is where the OpenDaylight controller processes 4 and 6 threads at once.

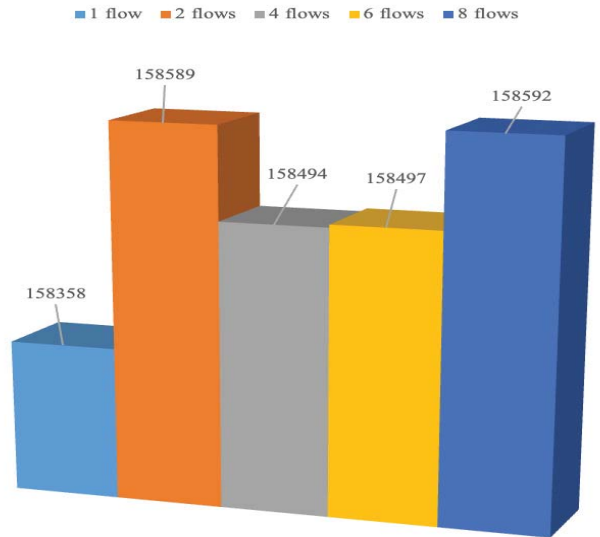


Fig. 4. Network Bandwidth Result for the First Type of Testing

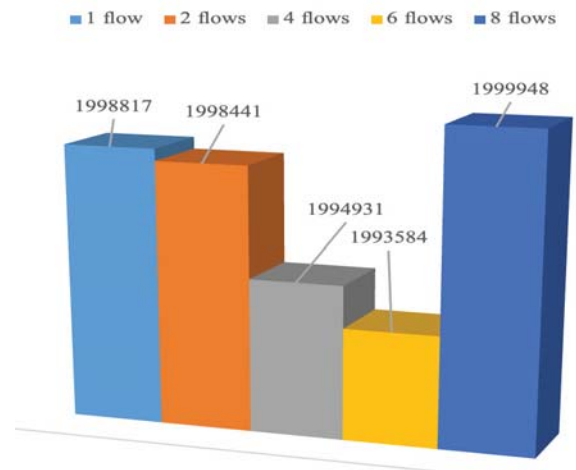


Fig. 5. Network Bandwidth Result for the Second Type of Testing

Test result when a Cbench object is started on each OpenDaylight controller and the switch does not perform load sharing (Figure 6).

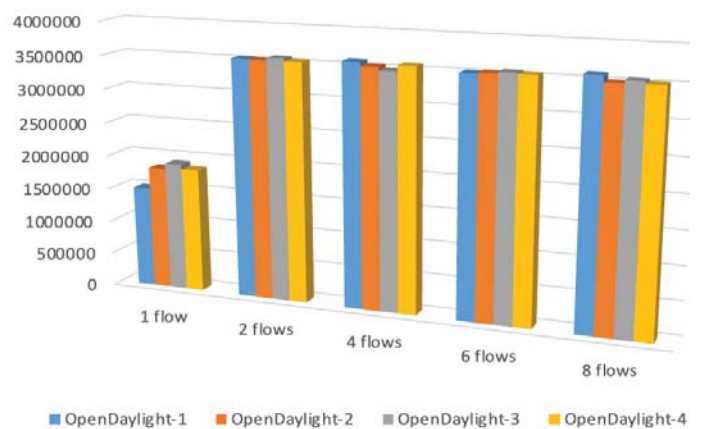


Fig. 6. Network Bandwidth Result for Third Test

As can be seen from the results, the lowest performance is observed when processing a single thread by a group of controllers.

Test result to examine the delay time when the OpenFlow controller does not perform load sharing (Figure 7).

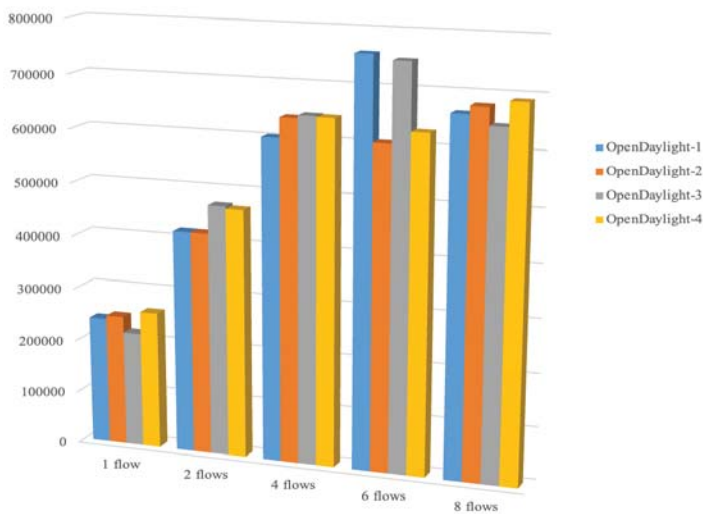


Fig. 7. Network Bandwidth Result for the Fourth Type of Testing

Total, based on the total results for all four types of tests (Figure 8).

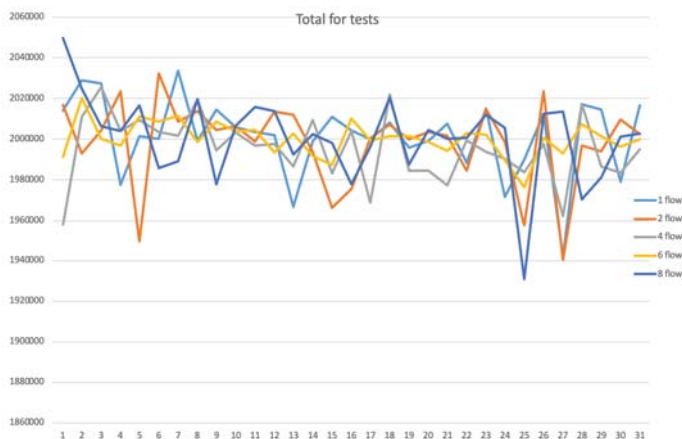


Fig. 8. Total sum of network performance for 31 experiments performed

As you can see from the results of the total, during the first two tests, the greatest performance increase is observed at 8 threads.

Conclusion

After network testing is complete, we can conclude that delays are the most significant aspect to reduce performance. In other words, the relationship between the OpenFlow switch and the OpenDaylight controller should have as little active network equipment as possible and give the highest available speed. This study shows that when the load is distributed to the controllers, there is no significant increase in performance.

When the switch is involved in load balancing: maximum throughput performance is observed where the OpenDaylight controller processes 2 and 8 threads at once, and minimum latency where the OpenDaylight controller processes 4 and 6 threads at once. When the switch does not perform load balancing, the lowest throughput performance is observed when processing one

thread by a group of controllers, and the minimum latency of one thread by a group of controllers.

References

- Habrahabr. Access mode: <http://habrahabr.ru/post/169403> (02.11.2022).
- Feamster N., Rexford J., Zeguraz E. (2013) The road to SDN: An intellectual history of programmable networks. *Networks*. Vol. 11. No. 12. P. 20-40.
- Astutoz B.N., Mendonca M., Nguyen X.N., Obraczka K., Turetli T. (2014) A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 16. No. 3, pp. 1617-1634.
- McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. (2008) Openflow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. Vol. 38. No. 2, pp. 69-74.
- Bozakov Z., Rizk A. (2013) Taming SDN controllers in heterogeneous hardware environments. *Proceedings of the Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN)*, pp. 50-55.
- Azodolmolky S., Wieder P., Yahyapour R. (2013) Performance evaluation of a scalable software-defined networking deployment. *Proceedings of the Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN)*, pp. 68-74.
- Azodolmolky S., Nejabati R., Pazouki M., Wieder P. (2013) An analytical model for software defined networking: A network calculus-based approach. *Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1397-14021.
- Jarschel M., Oechsner S., Schlosser D., Pries R., Goll S., Phoe T.G. (2011) Modeling and performance evaluation of an openflow architecture I. *Proceedings of the Twenty-third International Teletraffic Congress (ITC)*, pp. 1-7.
- Mahmood K., Chilwan A., Osterbo O., Jarschel M. (2015) Modeling of open-flow-based software-defined networks: the multiple node case. *JET Networks*. Vol. 4. No. 5, pp. 278-284.
- Xiong B., Yang K., Zhao J., Li W., Li K. (2016) Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model. *Computer Networks*. No. 102, pp. 174-183.
- O.I. Shelukhin, A.V. Osin, S.M. Smolsky (2008) Self-similarity and fractals // Telecommunications applications. Moscow: Fizmatlit. 368 p.
- Taggu M.S. (1988) Self-similar processes. In S. Kotz and N. Johnson, editors, *Encyclopedia of Statistical Sciences*. New York: Wiley. Vol. 8, pp. 352-357.
- Samuilov K.E., Shalimov I.A., Buzhin I.G., Mironov Y.B. (2018) Model of functioning of telecommunication equipment of software-configurable networks. *Modern information technologies and IT education*. Vol. 14. No. 1, pp. 13-26.
- Muhizi S., Shamshin G., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. (2017) Analysis and Performance Evaluation of SD Queue Model. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 10372, pp 26-37.
- Okamura H., Dohi T., Trivedi K.S. (2009) Markovian arrival process parameter estimation with group data. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. Vol. 17. Iss. 4, pp. 1326-1339.
- Overview of Promising FOSS Network Projects. Access mode: <https://xakep.ru/2014/07/17/promising-foss-projects/> (02.11.2022).
- Tavakoli A., Casado M., Koponen T. (2009) Applying nox to the datacenter. *Proceedings of HotNets*, issue 8, pp. 42-48.
- Curtis A., Mogul J., Tourrilhes J., Yalagan-Dula P., Sharma P. (2011) Devoflow: scaling flow management for high-performance networks. *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, vol. 1, pp. 127-133.
- Yu M., Rexford J., Freedman J., Wang J. (2010) Scalable flow-based networking with difane. *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, vol. 41, issue 4, pp. 351-362.
- Rob Sherwood, Kok-Kiong Yap. Cbench: an OpenFlow Controller Benchmark. Access mode: <http://www.openflow.org/wk/index.php/Oflops>. (16.11.2022)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЛЕРА OPENFLOW В СЕТИ С РАЗНОЙ НАГРУЗКОЙ

Якупов Денис Олегович, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, d.yakupov@psuti.ru

Малахов Сергей Валерьевич, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, malakhov-sv@psuti.ru

Аннотация

Одной из основных идей программно-определяемой сети является создание специального программного обеспечения (контроллера OpenFlow), позволяющего разделить управление существующим сетевым оборудованием (маршрутизаторами и коммутаторами) без его изменения. Это программное обеспечение может работать на отдельном ПК, которым управляет сетевой администратор. Поэтому в этой статье исследуется производительность контроллера OpenFlow. В этой статье описывается контроллер OpenFlow OpenDaylight, а также определяется его место в сетевой архитектуре программно-определяемой сети. Методология проведенного исследования эксперимента включает описание специального программного обеспечения Sbench. В работе Sbench запускался в двух режимах: режим задержки для отправки последующих пакетов и режим максимальной передачи данных для измерения пропускной способности. В режиме задержки каждый коммутатор отправляет один новый пакет в эмулируемый поток и ожидает ответа. После этого он отправляет следующий пакет и так далее. Задержка показывает время, которое требуется контроллеру для обработки запроса OpenFlow при низкой нагрузке. В режиме полосы пропускания каждый коммутатор отправляет запросы до тех пор, пока не заполнится буфер. Таким образом, этот режим позволяет измерить максимальную производительность, с которой может справиться контроллер. По представленной методике были собраны экспериментальные образцы сети. Эксперименты, следующие: 1) когда коммутатор распределяет нагрузку на контроллеры и 2) Sbench генерирует потоки для каждого из контроллеров отдельно. Меняется и режим работы программы Sbench. По результатам экспериментов получают данные о количестве пакетов, обработанных каждым контроллером в разных условиях.

Ключевые слова: программно-определяемая сеть, протокол OpenFlow, OpenDaylight, Sbench, производительность контроллера.

Литература

1. Habrahabr [Electronic resource]. Access mode: <http://habrahabr.ru/post/169403> (02.11.2022).
2. Feamster N., Rexford J., Zeguraz E. The road to SDN: An intellectual history of programmable networks // Networks. 2013. Vol. 11. No. 12. P. 20-40.
3. Astutoz B.N., Mendonca M., Nguyen X.N., Obraczak K., Turletti T. A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. No. 3, pp. 1617-1634.
4. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. Openflow: Enabling innovation in campus networks // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Vol. 38. No. 2, pp. 69-74.
5. Bzakov Z., Rizk A. Taming SDN controllers in heterogeneous hardware environments // Proceedings of the Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN), 2013, pp. 50-55.
6. Azodolmolky S., Wieder P., Yahapou R. Performance evaluation of a scalable software-defined networking deployment // Proceedings of the Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN), 2013, pp. 68-74.
7. Azodolmolky S., Nejabati R., Pazouki M., Wieder P. An analytical model for software defined networking: A network calculus-based approach // Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013, pp. 1397-14021.
8. Jarschel M., Oechsner S., Schlosser D., Pries R., Goll S., Phoe T.G. Modeling and performance evaluation of an openflow architecture I Proceedings of the Twenty-third International Teletraffic Congress (ITC), 2011, pp. 1-7.
9. Mahmood K., Chilwan A., Osterbo O., Jarschet M. Modelling of open-flow-based software-defined networks: the multiple node case // JET Networks. 2015. Vol. 4. No. 5. pp. 278-284.
10. Xiong B., Yang K., Zhao J., Li W., Li K. Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model // Computer Networks. 2016. No. 102, pp. 174-183.
11. O.I. Shelukhin, A.V. Osin, S.M. Smolsky, Self-similarity and fractals // Telecommunications applications. M.: Fizmatlit, 2008. 368 p.
12. Taggu M.S. Self-similar processes // In S. Kotz and N. Johnson, editors, Encyclopedia of Statistical Sciences. New York: Wiley. 1988. Vol. 8, pp. 352-357.
13. Samuilov K.E., Shalimov I.A., Buzhin I.G., Mironov Y.B. Model of functioning of telecommunication equipment of software-configurable networks//Modern information technologies and IT education. 2018. Vol. 14. № 1, pp. 13-26.
14. Muhizi S., Shamshin G., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. Analysis and Performance Evaluation of SD Queue Model // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372, pp 26-37.
15. Okamura H., Dohi T., Trivedi K.S. Markovian arrival process parameter estimation with group data // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2009. Vol. 17. Iss. 4, pp. 1326-1339.
16. Overview of Promising FOSS Network Projects [Electronic resource]. <https://xakep.ru/2014/07/17/promising-foss-projects/> (02.11.2022).
17. Tavakoli A., Casado M., Koponen T. Applying nox to the datacenter // Proceedings of HotNets, 2009, issue 8, pp. 42-48.
18. Curtis A., Mogul J., Tourrilhes J., Yalagan-Dula P., Sharma P. Devoflow: scaling low management for high-performance networks // Proceedings of the ACM SIGCOMM, 2011, vol. 1, pp. 127-133.
19. Yu M., Rexford J., Freedman J., Wang J. Scalable flow-based networking with difane // Proceedings of the ACM SIGCOMM, 2010, vol. 41, issue 4, pp. 351-362.
20. Rob Sherwood, Kok-Kiong Yap. Cbench: an OpenFlow Controller Benchmark [Electronic resource]. Access mode: <http://www.openflow.org/wk/index.php/Oflops>. (16.11.2022).

Информация об авторах:

Якупов Денис Олегович, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, ассистент кафедры При, г. Самара, Россия

Малахов Сергей Валерьевич, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доцент кафедры При, к.т.н., г. Самара, Россия

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



В феврале 2023 г. "Экспоцентре" состоялось заседание оргкомитета "Российской недели высоких технологий" (РНВТ) – проект, объединяющий несколько выставок, форумов и конференций в сфере информационных технологий, телекоммуникаций, навигации и телематики. РНВТ является частью проекта "НТИ-Экспо" ("Наука-Технологии-Инновации Экспо").

Проект учрежден Комитетом Государственной Думы ФС РФ по образованию и науке, ТПП России, АО "ЭКСПОЦЕНТР" и призван содействовать внедрению современных технологических достижений в промышленное производство, развитию сфер науки и техники, созданию благоприятных условий и поддержке молодых ученых и разработчиков. В 2023 году "Российская неделя высоких технологий" пройдет с 11 по 14 апреля.

Заседание провели председатель Оргкомитета Российской недели высоких технологий, заместитель председателя Комитета Государственной Думы ФС РФ по науке и высшему образованию Владимир Кононов и генеральный директор АО "Экспоцентр", председатель Комитета ТПП РФ по выставочно-ярмарочной и конгрессной деятельности Алексей Вялкин.

Основные события Недели – международная выставка информационных и коммуникационных технологий "Связь-2023", международный форум "Автонет-2023" – форум инновационных транспортных технологий, международный навигационный форум и конгресс "Сфера", экспозиция спутниковой навигации "Навитех-2023", форумы "Связь-2023" и "Российский софт: эффективные решения для цифровой экономики".

"СВЯЗЬ-2023" – самое значимое инфокоммуникационное событие года. Крупнейшая в России бизнес-площадка для общения профессионалов, для нахождения поставщиков и новых каналов сбы-

та, для выработки новых решений и определения трендов развития информационных технологий и телекоммуникаций.

Выставка "Связь" проводится с 1975 года и является крупнейшим мероприятием в России, СНГ и Восточной Европе в сфере телекоммуникаций и информационных технологий. Для новых разработок российских компаний "Связь" становится стартовой площадкой тестирования рыночных ниш, оценки продукта, поиска инвесторов, для зарекомендовавших себя решений – площадкой для популяризации и нахождения промышленных заказчиков.

На выставке широко представлены решения для фиксированной, сотовой, спутниковой и волоконно-оптической связи, сетей передачи данных, телекоммуникационное, серверное и сетевое оборудование, системы телевидения для кабельного и спутникового ТВ, радиовещания, специализированное программное обеспечение, решения в области информационной безопасности, виртуализации, интернет-технологии и услуги, решения для e-commerce и др.

В этом году в проекте принимают участие 20 новых компаний, также возвращается национальный павильон КНР, который представит около 70 китайских участников. Также запланирована обширная деловая программа, посвященная таким актуальным вопросам, как информационные технологии, искусственный интеллект в промышленности, импортозамещение в сфере телекоммуникаций, интернет вещей.

Международный Форум: "АВТОНЕТ" – "Форум инновационных транспортных технологий" – ежегодное ключевое мероприятие, посвященное развитию высокоавтоматизированного транспорта, автомобильным цифровым сервисам и транспортно-логистическим услугам.

Важнейшие темы Форума:

- Подключенные и высокоавтоматизированные транспортные средства. Возможности V2X. Автономная мобильность.
- Инновационные решения и сервисы на основе данных и искусственного интеллекта для ИТС
- Новая умная городская мобильность
- Цифровизация транспортной логистики. Беспилотные логистические коридоры.
- "Зеленая" энергия. Электротранспорт в России.
- Возможности больших данных в сфере Автонет.
- Стратегия, нормативное правовое и нормативно-техническое регулирование, гармонизация стандартов.

В Форуме примут участие лидеры и эксперты автомобильной, транспортной, цифровой и телематической отраслей, операторы платных участков дорог, представители регулирующих органов, государственных институтов и фондов развития, российских офисов зарубежных вендоров, руководители страховых и лизинговых компаний, поставщики телематического оборудования, операторы каршеринга, деловые и отраслевые СМИ.

"Навитех" – специализированное мероприятие в области гео-данных, транспортной и страховой телематики, подключенных и высокоавтоматизированных транспортных средств, гео- и транспортных информационных систем, интеллектуальной городской мобильности, высокоточной спутниковой навигации.

Ежегодно на "Навитехе" встречаются производители оборудования и разработчики специализированного программного обеспечения, телематических платформ, картографических приложений, ведущие интеграторы телематических решений и крупные конечные пользователи.

Производители и поставщики укрепляют связи с имеющимися клиентами и находят новых, получают живую обратную связь по своим продуктам, демонстрируют новинки и рассказывают о планах на будущее. Конечные пользователи, интеграторы, инвесторы имеют возможность найти нужных вендоров и поставщиков, получить очные консультации по интересующим вопросам и лично договориться о развитии сотрудничества с первыми лицами компаний-экспонентов.

На площадке "Навитеха" традиционно проходит Международный навигационный форум – крупнейшее в России деловое мероприятие в сфере навигации и телематики. На форуме обсуждаются итоги развития отрасли за прошедший год, ведущие эксперты выступают с докладами о развитии технологий, представители министерств и ведомств – о работающих и планируемых к запуску профильных государственных программах, руководители ключевых компаний отрасли делятся опытом и рассказывают об имеющихся наработках и планах развития.

Именно "Навитех" и Международный навигационный форум дали старт развитию программы спутниковой системы "ГЛОНАСС" и государственной автоматизированной информационной системы экстренного реагирования при авариях "ЭРА-ГЛОНАСС".

Рынок спутниковой навигации развивается. И на данном этапе следующими масштабными проектами, представленными на "Навитехе" и Международном навигационном форуме станут – сервисная телематическая платформа "Автодата" и программа развития космических информационных технологий "Сфера".

Тематика "Навитех"

Беспилотные, высокоавтоматизированные и подключенные автомобили. Технологии и решения, обеспечивающие постоянный рост возможностей беспилотного и высокоавтоматизированного транспорта и открывающие путь к новой эре беспилотной мобильности. Системы автономного вождения, активной безопасности, помощи водителю, распознавания дорожных знаков, разметки и пешеходов, взаимодействия транспортных средств между собой, информирования о дорожной обстановке, удаленной бортовой диагностики и другие решения. Российская навигационно-сервисная платформа "Автодата". Экосистема, продукты и сервисы.

Умные дороги. Цифровые двойники дорог, высокоточные и постоянно актуализируемые цифровые карты местности высокого разрешения, широкий набор датчиков, сенсоров, устройств и системы оптимизации и управления дорожным движением, обеспечивающее взаимодействие беспилотных и подключенных автомобилей с инфраструктурой умных дорог для быстрого и безопасного передвижения.

Умные города. Мир решений и технологий, делающих современный город более безопасным, комфортным, энергоэффективным и экологичным, чем когда-либо ранее. Спектр сервисов интеллектуальной городской мобильности МaaS (Мобильность как услуга), преобразующих традиционные представления об удобстве и скорости передвижения в городской среде. Городской микротранспорт.

Транспортная телематика. Последние достижения в области систем навигации и мониторинга автомобильного транспорта, управления парком транспортных средств, решения для умного страхования и других применений транспортной телематики и навигационно-сервисных платформ. Большие данные, искусственный интеллект и кибербезопасность в транспортной телематике. "ЭРА-ГЛОНАСС+" – продукты и сервисы. Рынок "Автонет" – передовые сервисы и услуги.

Космические технологии. Космические системы дистанционного зондирования земли и высокоточная спутниковая навигация для обеспечения максимально эффективной работы наземного транспорта и других отраслевых применений. Перспективная программа комплексного развития космических информационных технологий "Сфера".

Российской недели высоких технологий вошла в план основных мероприятий Десятилетия науки и технологий, в инициативу "Проектирование будущего", целью которой является привлечение талантливой молодежи в сферу исследований и разработок, содействие вовлечению исследователей и разработчиков в решение важнейших задач развития общества и страны.

В заседании приняли участие первый заместитель генерального директора АО "Экспоцентр" Сергей Селиванов, директор Центра компетенций по импортозамещению в сфере ИКТ Илья Массух, исполнительный директор АРПП "Отечественный софт" Ренат Лашин, директор ИД РБК, руководитель департамента бизнес-конференций Ирина Митрофанова и другие.

Пресс-служба АО "Экспоцентр"