

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

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

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблшер"

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

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

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2024

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 (РИНЦ)

Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);

Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;

Registry of Open Access Repositories (ROAR)

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

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

Media Registration Certificate

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

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of

Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2024

Editorial and Publisher Address

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

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

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович

(д.ф.-м.н., профессор, член 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 Detecop), Силиконовая долина, США

Елизаров Андрей Альбертович

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

Ибрагимов Байрам

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

Корбетт Ровэлл

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

Кузовкова Татьяна Алексеевна

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

Ныркoв Анатолий Павлович

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

Омельянов Георгий Александрович

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

Самойлов Александр Георгиевич

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

Сысоев Николай Николаевич

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

Чиров Денис Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шарп Майкл

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

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

- Агеев С.А., Гладких А.А., Брынза А.А., Каретников В.В., Савкин А.Л.**
Морфологический синтез в системе алгоритмов перестановочного декодирования с альтернативными решениями 4
- Волков А.С., Крейнделин В.Б.**
Алгоритмы кодирования алгебраических не двоичных каскадных сверточных кодов уменьшенной сложности 11

СВЯЗЬ

- Буранова М.А., Карташевский В.Г.**
Анализ влияния корреляции трафика на характеристики функционирования узла SDN по протоколу Open Flow 19

ИНФОРМАТИКА

- Грачев М.И., Бурлов В.Г.**
Человеческий фактор в принятии управленческих решений 27

ТРАНСПОРТ

- Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е.**
Определение эффективных широт интервалов влияния температурных режимов на интенсивность транспортного потока с использованием ранговой корреляции Спирмена 34

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

СВЯЗЬ

- Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов С.Н., Щурков А.О., Васильев А.П.**
Модели процессов совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных в сети ма-помощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью 41

ТРАНСПОРТ

- Смоленцев С.В., Буцанец А.А., Шахнов С.Ф., Ныркoв А.П., Ольховик Е.О.**
Алгоритм анализа данных автоматической идентификационной системы для выделения типовых сценариев расхождения судов и тестирования систем автономного судовождения 50

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Ageev S.A., Gladkikh A.A., Brynza A.A.,
Karetnikov V.V., Savkin A.L.
Morphological synthesis in the system of permutation
decoding algorithms with alternative solutions 4

Volkov A.S., Kreyndelin V.B.
Algorithms for encoding algebraic non-binary concatenated
convolutional codes of reduced complexity 11

COMMUNICATIONS

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G.
Analysis of the influence of traffic correlation on the performance
characteristics of an SDN node using the Open Flow protocol 19

COMPUTER SCIENCE

Grachev M.I., Burlov V.G.
Human factor in adoption management decisions 27

TRANSPORT

Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E.
Determining the effective latitudes of intervals of the influence
of temperature regimes on the intensity of traffic flow using
spearman's rank correlation 34

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMMUNICATIONS

Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N.,
Shchurkov A.O., Vasilyev A.P.
Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice
traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile
subscriber terminals based on high-throughput satellites 41

TRANSPORT

Smolentsev S.V., Butsanets A.A., Shakhnov S.F.,
Nyrkov A.P., Ol'khovik E.O.
Algorithm for analyzing the automatic identification system data
to identify typical scenarios for vessel divergence and testing
the systems of autonomous shipping 50

T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 18. No. 3-2024

Release date: 25.03.2024

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

Anatoliy P. Nyrkov

Doctor of sciences, Professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russia

Georgii A. Omel'yanov

Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, Mexico

Alexander G. Samoilov

Doctor of sciences, VLSU, Russia

Michael Sharpe

PhD, European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

Sergey S. Shavrin

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Nikolai N. Sysoev

Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University Lomonosov, Russia

Oleg V. Varlamov

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Albert Waal

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

Marina V. Yashina

Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

Andrey A. Yelizarov

Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

www.media-publisher.ru

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ В СИСТЕМЕ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-4-10

Агеев Сергей Александрович,
ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
Россия, serg123_61@mail.ru

Гладких Анатолий Афанасьевич,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия, a_gladkikh@mail.ru

Брынза Александр Александрович,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия, abrynza73@gmail.com

Каретников Владимир Владимирович,
ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
Россия, karetnikovvv@gumrf.ru

Савкин Александр Леонидович,
ФНПЦ АО "НПО "Марс", г. Ульяновск, Россия,
mars@mv.ru; savkin1957@inbox.ru

Manuscript received 02 February 2024;
Accepted 10 March 2024

Ключевые слова: морфологический синтез, перестановочное декодирование, эквивалентный код, производительная перестановка, непроизводительная перестановка, интервальный вектор, альтернативное решение

В статье выполнен морфологический анализ задач, которые решаются средствами помехоустойчивого кодирования в системах дистанционного управления роботизированными объектами. Приводятся и анализируются новые метод и алгоритмы защиты передаваемых данных от ошибок. Предложенные метод и алгоритмы разработаны на основе морфологического синтеза сведений, известных в данной предметной области, но комбинируемых по-иному для достижения технического решения, превосходящего по качеству известные аналоги. Например, применительно к известному методу перестановочного декодирования, связанного со способом мягкого декодирования, добавляется понятие когнитивной карты допустимых перестановок символов принятого приемником кодового вектора, что позволяет любые перестановки ограниченного множества символов вычислить априори и на их основе получить готовые решения по формированию параметров эквивалентного кода. Таким образом, сложные в арифметическом плане матричные преобразования, предписанные классическим методом получения эквивалентного кода, заменяются некоторым списком готовых решений. Это обеспечивает возможность в системах реаль-

ного времени использовать короткие двоичные избыточные коды. Показано, что для подобных кодов все перестановки делятся на два непересекающихся подмножества. Первая часть перестановок допускает получение эквивалентных кодов. Вторая часть перестановок приводит к вырожденным переставленным матрицам, которые не позволяют реализовать метод перестановочного декодирования. В работе обосновано, что обе части количественно примерно одинаковы для большинства двоичных кодов, что снижает эффективность использования метода перестановочного декодирования. Доказано, что любую перестановку в когнитивных картах можно представить, как логин в учетной записи. Но, в отличие от известных решений, каждый логин имеет добавление в формате альтернативных решений, позволяющее точно определить результативную последовательность действий по преобразованию конкретной ситуации с неудачной перестановкой. Применение добавлений позволяет повысить продуктивность процедуры перестановочного декодирования за счет одной альтернативной перестановки с 50% до 90% при использовании одновременно двух дополнительных перестановок.

Информация об авторах:

Агеев Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Телекоммуникации и защита информации" ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Радиотехника, телекоммуникации и защита информации" Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Россия

Брынза Александр Александрович, аспирант кафедры "Радиотехника, телекоммуникации и защита информации" Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Каретников Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Судоходства на внутренних водных путях", первый проректор ГУМРФ им адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Савкин Александр Леонидович, кандидат военных наук, доцент, начальник службы обеспечения научно-технической деятельности ФНПЦ АО "НПО "Марс", г. Ульяновск, Россия

Для цитирования:

Агеев С.А., Гладких А.А., Брынза А.А., Каретников В.В., Савкин А.Л. Морфологический синтез в системе алгоритмов перестановочного декодирования с альтернативными решениями // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 4-10.

For citation:

Ageev S.A., Gladkikh A.A., Brynza A.A., Karetnikov V.V., Savkin A.L. (2024). Morphological Synthesis in the System of Permutation Decoding Algorithms with Alternative Solutions. *T-Comm*, vol. 18, no.3, pp. 4-10. (in Russian)

Введение

Интенсивное развитие систем управления транспортными средствами без прямого участия человека, применение беспилотных аппаратов (БА) в качестве целевого дистанционного зондирования заданного участка местности или акватории, развитие робототехники объективно потребовали технологического объединения элементов систем управления с системами телекоммуникации. При этом основным средством организации канала связи является система радиосвязи, которая с точки зрения помехоустойчивости в наименьшей степени защищена от влияний помех естественного или преднамеренного характера. Защитой от влияния помех в радиоканале является использование кодовых или алгоритмических методов обработки данных, которые в совокупности позволяют повысить параметр энергетического выигрыша кода (ЭВК), обеспечивающего требуемый уровень достоверности данных [1-5].

Для получения наилучшего результата ЭВК предлагается использовать расширенное пространство поиска приемлемого технического решения, получившего название морфологического метода, включающего в себя последовательное использование морфологического анализа (МА) и морфологического синтеза (МС) [6-8]. Например, использование мягких решений по асимптотическим оценкам обеспечивает повышение ЭВК до 3 дБ [1, 2]. Дополнительный выигрыш теоретически можно получить за счет использования метода перестановочного декодирования (ПД) групповых избыточных кодов. В этом случае на основе мягких решений за счет ранжирования нумераторов символов в принятом кодовом векторе и переноса (перестановки) наиболее надежных символов на место информационных разрядов, и соответствующего преобразование порождающей матрицы основного кода G в матрицу эквивалентного кода (ЭК) $G_{ЭК}$ получить вектор такого кода [2, 5, 9]. Приемник после формирования вектора ЭК сравнивает его с переставленным вектором основного кода и по разнице символов определяется вектор ошибок, действовавший в канале связи в ходе приема комбинации основного кода.

Метод МС подсказывает, что крайне невыгодно тратить ресурс микропроцессора приемника на вычисление матрицы $G_{ЭК}$ практически для каждой принятой комбинации в классическом варианте, а вместе с этим определять обратную матрицу для ее переставленного аналога и по биекции принятого и переставленного вектора кодовой комбинации формировать матрицу перестановок. Наиболее важным моментом в описанной цепочке событий является вычисление для каждой переставленной матрицы ее определителя, поскольку для такой вырожденной матрицы найти обратную матрицу не представляется возможным. Но, как было показано выше, при реализации ПД все перестановки и их свойства могут быть определены заранее. Это означает, что для перестановок, у которых переставленная матрица $G_{пер}$ является невырожденной целесообразно для нее обратную матрицу $G_{пер}^{-1}$ оценить априори и занести это значение в когнитивную карту (КК) декодера. При этом такая карта получает название – КК производительных перестановок нумераторов (ППН) символов кодового вектора, поскольку такие перестановки в общем случае позволяют получить ЭК. В противном случае, КК получает наименование непроизводительных перестановок

нумераторов (НПН). По понятным причинам множества ППН и НПН не пересекаются и поэтому разрешение той или иной перестановки может производиться одновременно в двух КК. В результате поиска безальтернативно откликается только одна КК из двух.

Метод МС требует изучение тонкой структуры названной пары КК, которая может способствовать повышению эффективности системы ПД и правильной формулировке цели работы. Целью работы является исследование способов идентификации перестановок нумераторов символов кодовых векторов двоичных групповых кодов в ходе их преобразований в системе перестановочного декодирования.

Классификация перестановок и их статистические свойства

Принципы ПД систематических групповых кодов известны из источников [9-13]. Учитывая специфику практического использования БА для исследования были выбраны короткие избыточные коды (7, 4) – код Хэмминга; два кода Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) (15, 5) и (15, 7); совершенный код Голея (23, 12) и его укороченный аналог (19, 8). С использованием специально разработанной программы методом прямого перебора всех возможных перестановок нумераторов для указанных кодов были получены достаточно неожиданные данные по процентному соотношению ППН и НПН практически для всех кодов, которые приведены в таблице 1. Если для кода (7, 4) значение ППН существенно превосходит показатель НПН, что важно с практической точки зрения, то для других кодов это соотношение становится неудовлетворительным. Принципиально это означает, что в половине случаев процедура ПД оказывается не выполнима для достаточно эффективных алгебраически декодируемых кодов и обозначенный в работе [9] порог по исправлению $(n - k)$ ошибок оказывается якобы недостижимым.

Вместе с этим, обращение к методам МА показывает, что взятые из сетевых технологий способы сопровождения списочных записей альтернативными решениями, позволяющих, например, изменить маршрутизацию или иные важные параметры трафика, могут играть положительную роль и в системе ПД. Предлагается оценить закономерности записей априорных вычислений для КК, позволяющих снизить объем данных, вносимых в память процессора БА с указанием на основе МС пути рационального преобразования перестановок типа НПН к перестановкам ППН, и таким образом сделать более совершенной работу декодера на борту БА.

Таблица 1

Процентное соотношений ППН и НПН по результатам статистических испытаний

Хэмминга код (7, 4, 3)		Код БЧХ (15, 5, 7)		Код БЧХ (15, 7, 5)		Код Голея (23, 12, 7)		Код Голея – укороченный (18, 7, 7)	
ПП	НП	ПП	НП	ПП	НП	ПП	НП	ПП	НП
Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
80	20	62	38	51	49	52	48	52	48

Общее количество перестановок, требующих записи в КК декодера приведено в таблице 2.

В комбинаторике циклические сдвиги перестановок в регистре могут описываться единственной комбинацией, которая получила название образующей комбинации орбиты (ОКО) [14]. С технической точки зрения это означает, что объем памяти КК может быть уменьшен в n раз, поскольку в список заносятся не все комбинации орбиты, а только значенные ОКО [12].

Необходимым и достаточным условием получения любой комбинации орбиты является запись нумераторов ОКО в лексикографическом формате. Тогда однозначным признаком ОКО будет нумератор равный единице в левом старшем разряде.

В таком случае процедура поиска конкретной комбинации нумераторов из состава орбиты заменяется некоторым вычислительным процессом ее формирования из ОКО. Это означает, что простой поиск данных в некотором числовом массиве будет заменен вычислительным процессом, требующем определенных энергетических затрат [15, 16]. Более того, из-за замкнутости цикла перестановок, формируемых ОКО, в общей орбите переставленных по циклу комбинаций оказываются перестановки, признак которых может совпадать с форматом ОКО. Это становится ясным из анализа состава двух орбит, представленных на рисунке 1. В данной ситуации абстрактная алгебра указывает на так называемые тривиальные орбиты (ТО). Их число всегда равно значению k . Одна из этих ТО становится образующей комбинацией сборной орбиты (СО).

Таблица 2

Объем выборки ОКО для ППН некоторых кодов

Двоичный код	Объем перестановок	Общее количество ОКО	Объем выборки ОКО ППН	Машинное время составления КК
1	2	3	4	5
7, 4, 3	5040	20	16	30 с
15, 5, 7	$\approx 1.3 \cdot 10^{11}$	1001	616	70 с
15, 7, 5	$\approx 1.3 \cdot 10^{11}$	3003	1512	150 с
23, 12, 7	23!	705432	362880	900 с
19, 8, 7	19!	12376	6384	210 с

Код БЧХ (15, 5, 7)	Число циклов
4 6 7 9 13	
5 7 8 10 14	
6 8 9 11 15	
1 7 9 10 12 TO2	3
2 8 10 11 13	
3 9 11 12 14	
4 10 12 13 15	
1 5 11 13 14 TO3	1
2 6 12 14 15	
1 3 7 13 15 TO4	0
1 2 4 8 14 TO5	0
2 3 5 9 15	
1 3 4 6 10 TO1 CO	5
2 4 5 7 11	
3 5 6 8 12	
Повтор цикла. $det \neq 0$ ППН	

Код БЧХ (15, 5, 7)	Число циклов	
1 3 6 7 11 TO1	CO	4
2 4 7 8 12		
3 5 8 9 13		
4 6 9 10 14		
5 7 10 11 15		
1 6 8 11 12 TO2		3
2 7 9 12 13		
3 8 10 13 14		
4 9 11 14 15		
1 5 10 12 15 TO3		0
1 2 6 11 13 TO4		0
2 3 7 12 14		
3 4 8 13 15		
1 4 5 9 14 TO5		1
2 5 6 10 15		
Повтор цикла. $det = 0$ НПН		

Рис. 1. Пример структуры СО для двоичного кода БЧХ

Для кода БЧХ (15, 5, 7) на рисунке 1 приведены образцы двух СО. Для одной такой орбиты определитель перестановки не равный нулю приводит к ППН в отношении ЭК, в другом случае такой код получен быть не может (определитель перестановки равен нулю). Сравнение СО показывает, что у них много общего, но из-за показателей определителей матриц $G_{пер}$ они должны быть занесены в разные КК: соответственно в КК ППН и НПН. Показатель ОКО из числа ТО для СО оценивается по наименьшей разнице между нумератором, стоящим в левом разряде (для любой ОКО равен единице) и нумератором, стоящим на k позиции (младший разряд в записи справа). Для кода (15, 5, 7), как следует из рисунка 1, это будет комбинация 1 3 4 6 10 для орбиты ППН и комбинация 1 3 6 7 11 для орбиты НПН. Как правило, такая орбита порождает наибольшее число циклических сдвигов. В последующем число циклов играет важную роль в системе вычисления производных матриц из единственного эталонного образца матрицы $G_{пер}$ для системы перестановок ППН. Этот процесс достаточно ясно описан в работах [17, 18].

Главная задача данной работы заключается в развитии нового направления в ПД – это разрешение неопределенности в ходе обработки данных из КК НПН [19, 20]. Для оценки возможных решений в ходе имитационного моделирования процедуры ПД был выбран код БЧХ (15, 5, 7). На рисунке 2 представлена сравнительная диаграмма двух кодов в условиях игнорирования возможных альтернативных решений для множества НПН. Ожидается, что производительность процедуры ПД в указанных условиях для кода БЧХ будет крайне недостаточной.

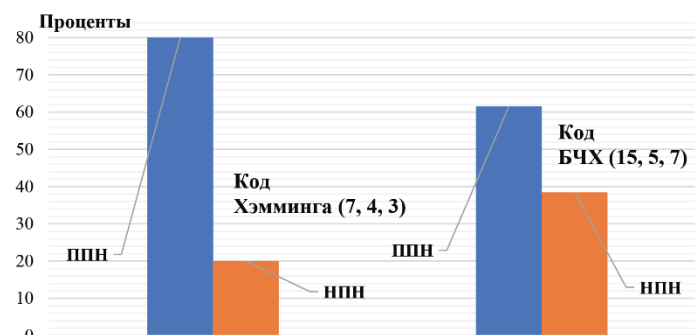


Рис. 2. Сравнительные характеристики кодов по параметрам ППН и НПН

Из таблицы 1 следует, что другие коды, кроме указанных на рисунке 2, будут иметь еще худшее соотношение между показателями ППН и НПН.

Понятие интервальных оценок в перестановках. Перестановки ППН

Рассмотрим последовательность нумераторов ОКО СО 1 3 4 6 10. Из рисунка 1 (только левая таблица) следует, что ТО1, к которой относится данная перестановка для всех перестановок из состава этой орбиты будет одинаковый интервал между соседними нумераторами. Легко проверить, что для представленного примера это будет последовательность вида 2 1 2 4. Действительно, циклический сдвиг нумераторов по регистру сдвига не меняет расстояние между нумераторами.

Свойство 1. Интервальные оценки являются более информативными относительно свойств своей ТО, при этом оказываются на полбайта меньше показателя перестановки, что важно для объема памяти КК.

Свойство 2. Если интервальная оценка не является орбитой ОКО СО, то другие $(k - 1)$ ОКО ТО в составе интервальной оценки имеют маркер, который указывает на шаги циклических изменений проверочной части порождающей матрицы в систематической форме. Образец проверочной матрицы хранится в специальной КК.

Свойство 3. Порождающие матрицы для ОКО ТО формируются на основе сведений о количестве ОКО, формируемых в рамках одной орбиты. Например, для ОКО СО будет сформировано всего пять ОКО. Следовательно, для ОКО ТО2 с показателем интервальных оценок 6 2 1 2 комбинации в исходной матрице должны быть сдвинуты по циклу на пять шагов. Тогда последовательность нижней строки 0110010111 преобразуется и для ТО2 с интервальными оценками 6 2 1 2 будет сформирован вектор 1011101100, который по вертикальному циклу передвигается на верхнюю строку матрицы. Сказанное относится ко всем последующим показателям ТО.

Свойство 4. Внутри отдельной орбиты ТО проверочные части порождающих матриц ЭК образуются каждый раз за счет перестановки правого столбца на позицию левого столбца формируемой новой матрицы новой перестановки.

Преобразования проверочной части матрицы $G_{пер}$ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Систематические преобразования поверочной части порождающей матрицы ЭК в зависимости от содержания ОКО ТО с маркером 6

1 3 4 6 10	1 7 9 10 12	1 5 11 13 14	1 3 7 13 15	1 2 4 8 14
2 1 2 4	6 2 1 2	4 6 2 1	2 4 6 2	1 2 4 6
1010101101	1011101100	1111011010	1010011111	1011111000
0101111100	0110110101	1001011101	0111101101	1010011111
1101001111	1110001011	1010110110	1100101110	0111101101
1011110110	0111111010	0111110001	0101011011	1100101110
0110010111	1011010111	0100111111	1011111000	0101011011
Эталон	Сдвиг эталона на 5 циклов вправо	Сдвиг колонки 6212 на 3 цикла вправо	Сдвиг колонки 4621 на 1 цикл вправо	Нет сдвига

Заметно, что маркер отсутствует в левой колонке таблицы. Это является признаком ОКО СО. С практической точки зрения нет необходимости все матрицы держать в памяти когнитивной карты декодера. Матрицы с маркерами достаточно просто формируются за счет циклических сдвигов эталонной матрицы СО.

Таким образом, матричные преобразования в системе ППН сводятся к циклическим преобразованиям некоторой исходной матрицы в требуемой матрицы ЭК для конкретной перестановки без выполнения арифметических операций в матричном пространстве.

Особенности обработки НПН

Главной отличительной чертой НПН является вырожденность переставленных матриц нумераторов наиболее надежных символов, принятых приемником кодовых векторов.

Это ставит под сомнение эффективность ПД по параметру ЭВК, поскольку процедура поиска результативной перестановки неоправданно затягивается по времени. Требуется оригинальное техническое решение для снижения уровня отрицательного эффекта в системе оптимальных по ЭВК кодов. В других отношениях поиск ОКО различного класса не отличается от алгоритмов выявления подобных орбит в системе производительных перестановок.

Переходя от перестановок к интервальным таблицам, можно заметить, что структура различий соседних значений нумераторов ничем не отличается от описанных выше применительно к множеству производительных перестановок и показана для одного из кодов в таблице 4. Это позволяет утверждать, что в реальном декодере в целях экономии времени анализа, принятого кодового вектора целесообразно направлять данные одновременно и на вход карты ППН, и на вход карты НПН. Очевидным является свойство, которое указывает на отсутствие пересечений указанных множеств. Поэтому отклик должен быть либо на выходе карты ППН, либо на выходе карты НПН. Идентичность процедуры поиска для множества ППН и НПН указывает на целесообразность распараллеливания вычислительного процесса поиска альтернативного признака принадлежности перестановки к одному или другому множеству. В предыдущих работах эта процедура носила последовательный характер. На первом этапе оценивалась принадлежность принятой приемником перестановки к числу произвольных и при отрицательном исходе (следовательно, перестановка непроизводительная) оценивалась возможность коррекции такой перестановки за счет замены младшего разряда из группы информационных символов на старший разряд из группы нумераторов проверочных разрядов.

Таблица 4

Структура разниц нумераторов ОКО частных орбит перестановки 1 4 6 8 9

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов
1 4 6 8 9	3 2 2 1
1 8 11 13 15	7 3 2 2
1 2 9 12 14	1 7 3 2
1 3 4 11 14	2 1 7 3
1 3 5 6 13	2 2 1 7

Описанный алгоритм удобен при использовании кода (7, 4), когда число производительных перестановок составляет 80% от общего числа возможных перестановок. Для кодов БЧХ (15, 5) и (15, 7) эта пропорция изменяется в сторону увеличения числа непроизводительных перестановок и по этой причине становится невыгодной из-за соотношения ППН к НПН, как 50% к 50%. При этом вероятность удачной замены символов остается относительно низкой, поскольку новая перестановка после заметны символов может вновь оказаться из множества НПН.

По этой причине предлагается использовать более совершенный алгоритм когнитивного регулятора, когда в системе замены НПН появляются сведения о непродуктивных заменах. В этом случае таблица 3 преобразуется в таблицу 4.

Суть работы когнитивного регулятора в согласовании данных между когнитивными картами ППН и НПН заключается в более полном информационном обеспечении процедуры поиска ППН. Например, при использовании

параллельной работы когнитивных карт регулятор обобщает результат такого поиска и принимает рациональное решение в процедуре поиска ЭК. Фрагмент одной записи карты НПП представлен в таблице 5.

Для организации процедуры рационального поиска данных в карте НПП глобальные и частные ОКО должны быть классифицированы лексикографически, что вытекает из семантических моделей традиционных поисковых систем.

Таблица 5

Структура нумераторов ОКО из состава НПП (фрагмент)

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов	Запрещенные нумераторы
1 2 3 4 6	1 1 2 2	8 9 12
1 11 12 13 14	10 1 1 1	3 4 7
1 3 13 14 15	2 10 1 1	ВСЕ
1 2 4 14 15	1 2 10 1	6 7 10
1 2 3 5 15	1 1 2 10	7 8 11

Становятся ясны закономерности абстрактной алгебры применительно к множеству НПП, рассматриваемого совместно за закономерностями построения проверочной матрицы избыточного кода. При этом запрещенные нумераторы однозначно не являются продуктивными при попытке перевода перестановки из множества НПП в систему ППП. Исследование полной таблицы 5 показало, что запрещенное число значений нумераторов для разных ОКО из состава НПП может быть различным, но все без исключения перестановки имеют индекс **ВСЕ**. Этот факт в теории кодирования вскрыт впервые. Он нашел свое теоретическое объяснение, заключающееся в проявлении линейной зависимости строк матрицы $G_{пер}$.

Выявлены предпосылки к закономерности, при которой ни один из символов из состава проверочной матрицы не приводит перевод перестановки, обозначенной термином **ВСЕ** в систему ППП. Предварительно установлено, что такая замена обеспечивает положительный результат только при использовании двух или трех перестановок между информационными и проверочными разрядами, как показано на рисунке 3.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[|A|=0]{\rightarrow A'} A' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow |A'| = 1$$

Рис. 3. Пример замены двух столбцов в матрице A с индексом **ВСЕ**

На рисунке 3 представлена ситуация, при которой приемник принял последовательность символов и по результатам их ранжирования была получена последовательность, состоящая из двух кортежей [1 2 4 6 15] [3 5 7 8 9 10 11 12 13 14].

В первой последовательности оказались наиболее надежные символы. Во второй последовательности в левой ее часть будут менее надежные символы, но с высокой вероятностью принятые правило по результатам фиксации жестких решений. В правой части второй последовательности окажутся символы с низкими значениями мягких решений, которые с высокой вероятностью будут ошибочными. В подобной ситуации для замены двух столбцов в матрице A целесообразно выбрать столбцы из второго кортежа с номерами 3 и 5.

Это приводит к образованию матрицы A' , которая обеспечивает получение ЭК.

На рисунке 4 показаны изменения в диаграмме при однократных перестановках столбцов.

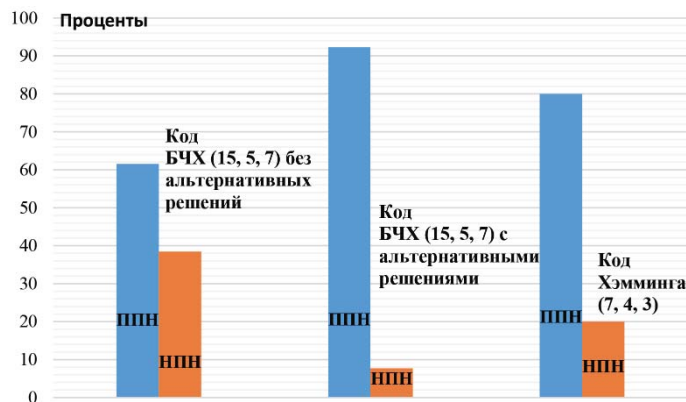


Рис. 4. Сравнительная характеристики кодов по параметрам ППП и НПП при использовании одинарных альтернативных решений

Вскрытые в ходе исследования закономерности перестановок в системе ПД позволяет упростить известные подходы к декодированию данных. В новых условиях декодер после выделения k надежных символов вычисляет интервальную разницу и формирует ОКО, которое одновременно направляет на входы когнитивной карты ППП и НПП. Поскольку множества реализаций этих карт не пересекаются, то ответ может быть получен только на выходе одной из указанных карт. Если отвечает карта ППП, то выявляется соответствующая проверочная матрица с учетом циклических сдвигов основной матрицы. В противном случае, корректируется последний столбец перестановки в группе информационных разрядов с учетом запрещенных нумераторов. Процесс продолжается в соответствии с классическим алгоритмом выявления вектора ошибок в системе ПД.

Заключение

С точки зрения абстрактной алгебры в работе показаны ранее неизвестные свойства циклических перестановок замкнутого множества натуральных чисел, состоящего из n элементов, в котором при выделении произвольных $k < n$ элементов однозначно образуются k независимых орбит, начинающихся на наименьшее из выбранных n элементов.

Синтез указанного свойства с закономерностями построения групповых двоичных систематических кодов показывает, что при формировании орбит все множество возможных перестановок нумераторов кодовых векторов разбивается на два непересекающихся множества. Каждое из этих множеств в отдельности отражает свойство вырожденности (или напротив) порождающих переставленных матриц, что означает невозможность (или возможность) формирования ЭК.

Показана возможность быстрой коррекции вырожденных матриц за счет заранее вычисленных альтернативных решений в перестановках. За счет свойства непересекающихся множеств орбит показана возможность распараллеливания процесса идентификации конкретной перестановки относительно принадлежности тому или другому множеству.

Процесс поиска решения для двух множеств может решаться одновременно.

Предложено семейство микроконтроллеров для реализации принципов ПД с системой альтернативных решений.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс. 2003. 1104 с.

2. Morelos-Zaragoza R. The Art of noise-tolerant coding. Methods, algorithms, and applications. М.: Техносфера, 2005. 320 с.

3. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.

4. Аджемов А.С., Санников В.Г. Общая теория связи. Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 624 с.

5. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с.

6. Zwicky F. Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach. New York: McMillan, 1969.

7. Акимов С.В. Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб., 2004. № 171. С. 165-173.

8. Акимов С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области / <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2> / 04.12.2023.

9. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52-56.

10. Gladkikh A. A., Ganin D. V., Pchelina N. A., Shakhtanov S. V., Ocherpovsky A. V. Coding Methods and Permutation Decoding in the Systems for Network Processing of Data // International Journal of Control and Automation Vol. 13, No.1, (2020), pp. 93-110.

11. Давыдов И.Ю., Козлов Д.А., Шахтанов С.В., Шибаева М.Ю. Перестановочное декодирование в системе комбинаций кодовых

конструкций при оценке биометрических данных // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 85-92.

12. Ганин Д.В., Дамдам М.А.Я., Савкин А.Л. Перестановочное декодирование в маломощных беспроводных сенсорных сетях // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (68). С. 54-61. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_68_54.

13. Новоселов А.В., Шахтанов С.В., Аль-Месри А.С.А., Толикина М.Ю. Оценка критериев эффективности защиты данных от ошибок на базе перестановочного декодирования // Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 27-34. doi:10.35752/1991-2927_2022_3_69_27.

14. Фрид Э. Элементарное введение в абстрактную алгебру. Пер. с венгер. Ю.А. Данилова. М.: Мир, 1979, 260 с.

15. Саид Б.А.С., Пчелин Н.А. Модификация способа оценивания мягких решений символов и его верификация // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (67). С. 60-67. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_67_60.

16. Дамдам М.А.Я. Метод снижения сложности декодирования недвоичных избыточных кодов DSPA // 22 Международная конференция. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2020. С. 237-242.

17. Бабанов Н.Ю., Шахтанов С.В. Циклические свойства орбит перестановок когнитивной карты перестановочного декодера систем реального времени // Проектирование и технология электронных средств. 2020. №4(62). С.85-92.

18. Атнаби А.Л.Х., Брынза А.А., Ганин Д.В., Ничунаев А.А., Новоселов А.В. Оценка статистических характеристик перестановочного декодера методом его программной реализации // Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91-98. doi:10.35752/1991-2927_2023_2_72_91.

19. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. 2-е изд. Стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 284 с.

20. Аль-Месри А.С.А., Пчелин Н.А., Дамдам М.А.Я., Брынза А.А. Парадигма нейросетевого декодирования недвоичных избыточных кодов // Автоматизация процессов управления. 2021. № 1 (63). С. 74-81. doi:10.35752/1991-2927-2021-1-63-74.

MORPHOLOGICAL SYNTHESIS IN THE SYSTEM OF PERMUTATION DECODING ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE SOLUTIONS

Sergey A. Ageev, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia, serg123_61@mail.ru

Anatoly A. Gladkikh, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia, a_gladkikh@mail.ru

Alexander A. Brynza, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia, abrynza73@gmail.com

Vladimir V. Karetnikov, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia,

karetnikovvv@gumrf.ru

Alexander L. Savkin, FPPC JSC RPA "MARS", Ulyanovsk, Russia, mars@mv.ru; savkin1957@inbox.ru

Abstract

The paper performs a morphological analysis of the problems that are solved by means of noise-resistant coding in systems of remote control of robotic objects. A new method and algorithms for error protection of transmitted data are presented and analyzed. The proposed method and algorithms are developed on the basis of morphological synthesis of information known in this subject area, but combined in a different way to achieve a technical solution superior in quality to known analogs. For example, concerning to the known method of permutation decoding, connected with the method of soft decoding, the concept of a cognitive map of admissible permutations of symbols of the code vector accepted by the receiver is added, that allows to calculate any permutations of the limited set of symbols a priori and on their basis to receive ready decisions on formation of parameters of the equivalent code. Thus, arithmetically complex matrix transformations prescribed by the classical method of obtaining the equivalent code are replaced by some list of ready solutions. This provides the possibility to use short binary redundant codes in real-time systems. It is shown that for such codes all permutations are divided into two non-overlapping subsets. The first part of permutations allows to obtain equivalent codes. The second part of permutations leads to degenerate permuted matrices which do not allow to realize the method of permutation decoding. In the work it is proved that both parts are quantitatively approximately identical for the majority of binary codes that reduces efficiency of use of the method of permutation decoding. It is proved that any permutation in cognitive maps can be represented as a login in an account. But, unlike the known solutions, each login has an addendum in the format of alternative solutions, allowing to define precisely the productive sequence of actions on transformation of a concrete situation with unsuccessful permutation. Application of additions allows to increase productivity of procedure of permutation decoding at the expense of one alternative permutation from 50% up to 90% at use simultaneously two additional permutations.

Keywords: morphological synthesis, permutation decoding, equivalent code, productive permutation, unproductive permutation, interval vector, alternative solution.

References

1. B. Sklyar, "Digital communication. Theoretical foundations and practical applications," Moscow: Williams. 2003. 1104 p.
2. R. Morelos-Zaragoza, "The Art of noise-tolerant coding. Methods, algorithms, and applications," Moscow: Technosphere. 2005. 320 p.
3. W. Peterson, E. Weldon, "Error-correcting codes," Moscow: Mir, 1976. 594 p.
4. A.S., Adjemov, V.G. Sannikov, "General theory of communication," Textbook for universities. Moscow: Hot Line – Telecom, 2018. 624 p.
5. V.A. Vargauzin, I.A. Tsikin, "Methods of increasing the energy and spectral efficiency of digital radio communication," SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 352 p.
6. F. Zwicky, "Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach," New York: McMillan, 1969.
7. S.V. Akimov, "Four-level integrative model for automation of the structure-parametric synthesis," *Proceedings of educational institutions of communication*. SPbGUT. 2004. No. 171, pp. 165-173.
8. S.V. Akimov, "Introduction to morphological methods of research and modeling of subject area knowledge," <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2> / 04.12.2023.
9. A.A. Gladkikh, "Permutation decoding as a tool for increasing the energy efficiency of data exchange systems," *Elektrosvyaz*. 2017. No. 8, pp. 52-56.
10. A.A. Gladkikh, D.V. Ganin, N.A. Pchelin, S.V. Shakhtanov, A.V. Ochevovsky, "Coding Methods and Permutation Decoding in the Systems for Network Processing of Data," *International Journal of Control and Automation*. Vol. 13. No. 1, 2020, pp. 93-110.
11. I.Yu. Davydov, D.A. Kozlov, S.V. Shakhtanov, M.Yu. Shibaeva, "Permutation decoding in the system of combinations of code constructions in the evaluation of biometric data," *Automation of control processes*. 2019. No. 2 (56), pp. 85-92.
12. D.V. Ganin, M.A.Y. Damdam, A.L. Savkin, "Permutation decoding in low-power wireless sensor networks," *Automation of control processes*. 2022. No. 1 (68), pp. 54-61. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_68_54.
13. A.V. Novoselov, S.V. Shakhtanov, A.S.A. Al-Mesri, M.Y. Tolikina, "Estimation of the criteria of the data protection efficiency from errors on the basis of the permutation decoding," *Automation of control processes*. 2022. No. 3 (69), pp. 27-34. doi:10.35752/1991-2927_2022_3_69_27.
14. E. Fried, "Elementary introduction to abstract algebra," Moscow: Mir, 1979. 260 p.
15. B.A.S. Said, N.A. Pchelin, "Modification of the method of soft symbol solutions estimation and its verification," *Automation of control processes*. 2022. No. 1 (67), pp. 60-67. doi:10.35752/1991-2927_2022_1_67_60.
16. M.A.Y. Damdam, "A method to reduce the decoding complexity of non-binary redundant DSPA codes," *22nd International Conference. Ser. "Digital signal processing and its application"*. Moscow. 2020, pp. 237-242.
17. N.Yu. Babanov, S.V. Shakhtanov, "Cyclic properties of the permutation orbits of the cognitive map of the permutation decoder of the real-time systems," *Designing and technology of electronic means*. 2020. No.4(62), pp. 85-92.
18. A.L.H. Attabi, A.A. Brynza, D.V. Ganin, A.A. Nichunaev, A.V. Novoselov, "Estimation of statistical characteristics of the permutation decoder by the method of its program realization," *Automation of control processes*. 2023. No. 2 (72), pp. 91-98. doi:10.35752/1991-2927_2023_2_72_91.
19. V.V. Borisov, V.V. Kruglov, A.S. Fedulov, "Fuzzy models and networks," 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 2017. 284 p.
20. A.S.A. Al-Mesri, N.A. Pchelin, M.A.Y. Damdam, A.A. Brynza, "Paradigm of neural network decoding of non-binary redundant codes," *Automation of control processes*. 2021. No. 1 (63), pp. 74-81. doi:10.35752/1991-2927_2021_1_63_74.

Information about authors:

Sergey A. Ageev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Telecommunications and Information Protection", Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Anatoly A. Gladkikh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Radio Engineering, Telecommunications and Information Protection", Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Alexander A. Brynza, postgraduate student of the Department of "Radio Engineering, Telecommunications and Information Protection" Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Vladimir V. Karetnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Inland Waterways Navigation Department, First Vice-Rector, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Alexander L. Savkin, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Head of the Service of Scientific and Technical Activity Support of FPPC JSC RPA "MARS", Ulyanovsk, Russia

АЛГОРИТМЫ КОДИРОВАНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ НЕДВОИЧНЫХ КАСКАДНЫХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ УМЕНЬШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-11-18

Волков Алексей Станиславович,
Национальный исследовательский университет
"Московский институт электронной техники",
Зеленоград, Москва, Россия, leshvol@mail.ru

Manuscript received 07 February 2024;
Accepted 12 March 2024

Крейнделин Виталий Борисович,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия, v.b.kreindelin@mtuci.ru

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, сверточные коды, построение сверточных кодов, вычислительная сложность, порождающий многочлен, каскадные коды

Для обеспечения высокой достоверности передаваемой информации в проводных и беспроводных телекоммуникационных системах и сетях применяются помехоустойчивые коды. Добиться высокой достоверности при относительно невысокой сложности алгоритмов кодирования и декодирования удастся за счет применения каскадных кодов. Каскадный код представляет собой кодовую конструкцию, основанную на последовательном соединении нескольких компонентных помехоустойчивых кодов. С практической точки зрения, наибольший интерес вызывают каскадные коды с двумя степенями кодирования. Одну степень кодирования называют внешней, а другую внутренней. В работе разработан алгоритм формирования порождающих многочленов внешней и внутренней ступени, которые позволяют однозначно определять алгебраические каскадные сверточные коды с заранее заданными параметрами и произвольными длинами кодовых ограничений за фиксированное количество шагов. Разработаны алгоритмы кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов, с использованием быстрых алгоритмов вычисления циклической свертки на каждой из ступеней, причем, для нахождения многочленов кодовых слов $s(x)$ и $\bar{s}(x)$, длины порождающих и информационных многочленов выбраны соизмеримыми с длинами циклических сверток на внешней и внутренней ступени соответственно. Применение быстрых алгоритмов вычисления свертки Агарвала-Кули и Винограда целесообразно использовать на внешней ступени кодирования недвоичного алгебраического каскадного сверточного кода. Это дает возможность уменьшить число арифметических операций в поле $GF(q^p)$ при вычислении многочлена кодового слова $s(x)$. Для уменьшения числа арифметических операций в поле $GF(q^m)$ на внутренней ступени, рекомендуется использовать быстрый алгоритм Винограда вычисления свертки. Это связано с тем, что на внутренней ступени кодирования, как правило, рекомендуют использование кодов с меньшей длиной кодового ограничения и построенных над меньшими полями, по сравнению с кодами внешней ступени. Для оценки вычислительной сложности алгоритма кодирования на основе синтеза алгоритмов Агарвала-Кули и Винограда представлены соответствующие выражения для компонентных алгебраических сверточных кодов на каждой из ступени.

Информация об авторах:

Волков Алексей Станиславович, к.т.н., доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Зеленоград, Москва, Россия

Крейнделин Виталий Борисович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Теория электрических цепей" Московский технический университет связи и информатики", Москва, Россия

Для цитирования:

Волков А.С., Крейнделин В.Б. Алгоритмы кодирования алгебраических недвоичных каскадных сверточных кодов уменьшенной сложности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 11-18.

For citation:

Volkov A.S., Kreindelin V.B. (2024) Algorithms for encoding algebraic non-binary concatenated convolutional codes of reduced complexity. T-Comm, vol. 18, no.3, pp. 11-18. (in Russian)

Введение

В настоящее время для обеспечения высокой достоверности передаваемой информации в телекоммуникационных системах и сетях применяются помехоустойчивые коды [1-4]. Добиться высокой достоверности при относительно невысокой сложности алгоритмов кодирования и декодирования удастся за счет применения каскадных кодов [5-8]. Каскадный код представляет собой кодовую конструкцию, основанную на последовательном соединении нескольких компонентных помехоустойчивых кодов [1]. С практической точки зрения, наибольший интерес вызывают каскадные коды с двумя ступенями кодирования. Одну ступень кодирования называют внешней, а другую внутренней [2].

В качестве компонентных кодов внешней и внутренней ступени широкое применение нашли блочные (коды РС и БЧХ) и сверточные коды [9]. При этом, комбинируя различные компонентные коды в составе каскадного кода, удается получить новые классы кодов [10-12]. Следовательно, построение каскадного кода определяется выбором компонентных кодов.

Класс обобщенных каскадных кодов предусматривает разложение кода внутренней ступени на подкоды, которые соответствуют подкодам внешней ступени кода. Следовательно, такое теоретическое обобщение позволяет строить каскадные коды с числом компонентных кодов больше двух [9-11].

В настоящее время существует множество различных классов каскадных кодов и их модификаций (обобщенные линейные каскадные коды, сверточные каскадные коды, обобщенные сверточные каскадные коды с единичной памятью и т.д.) [12-16].

На рисунке 1 представлен общий принцип построения каскадного сверточного кода [12].

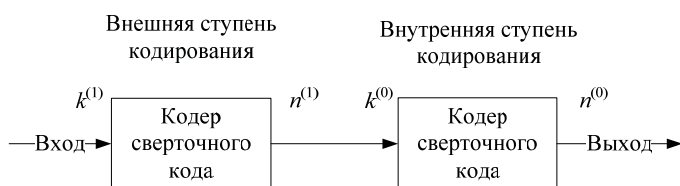


Рис. 1. Принцип построения кодера каскадного сверточного кода

Принцип каскадного сверточного кодирования следующий. На вход каскадного сверточного кодера поступает информационная последовательность, которая разбивается на кадры по $k^{(1)}$ символов в каждом кадре. Результатом кодирования кодера сверточного кода внешней ступени является кадр кодового слова, состоящий из $n^{(1)}$ символов, формирование которого происходит с учетом символов, хранящихся в памяти кодера внешней ступени. При этом считается, что однозначное соответствие (реализация функции кодирования [13, 17]) кадра информационных символов $k^{(1)}$ кадру кодового слова $n^{(1)}$ осуществляется за одну единицу времени работы кодера. Далее предполагается, что выполняется равенство $n^{(1)} = k^{(0)}$ (это необходимо для согласования кодера внешней и внутренней ступени кодирования) и одному кадру информационных символов $k^{(0)}$ с учетом символов, хранящихся в памяти кодера внутренней ступени, сопоставляется кадр кодового слова $n^{(0)}$ [17].

Целью данной работы является разработка алгоритмов построения порождающих многочленов алгебраически заданных сверточных каскадных кодов, а также разработка алгоритмов кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов на основе процедур быстрого вычисления сверток для уменьшения вычислительной сложности кодирования.

Результаты исследования

Рассмотрим алгоритм определения порождающих многочленов каскадного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода пошагово.

ШАГ 1. Ввод параметров $k^{(0)}, k^{(1)}, n^{(0)}, n^{(1)}, r$ алгебраических сверточных кодов внешней и внутренней ступени кодирования и требуемой скорости кодирования R_k каскадного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода.

ШАГ 2. Выбор примитивных многочленов степени p и m и построение конечных полей $GF(q^p)$ и $GF(q^m)$.

ШАГ 3. Выполнение расчета скоростей алгебраических сверточных кодов внешней и внутренней ступени кодирования: $R_1 = k^{(1)}/n^{(1)}$ и $R_0 = k^{(0)}/n^{(0)}$.

ШАГ 4. Проверка условий согласования по скорости сверточного кода внешней и внутренней ступени кодирования. Если $k^{(0)} = p$, либо $k^{(0)}$ – делит число $(2r - 1) \cdot p$ без остатка, то внешняя и внутренняя ступени кодера согласованы по скорости. При невыполнении условия, необходимо изменение одного или нескольких параметров сверточных кодов.

ШАГ 5. Выбор способа обработки символов на каждой из ступени.

ШАГ 6. Построение порождающих многочленов $u(x)$ над $GF(q^p)$ и $w(x)$ $GF(q^m)$ недвоичных циклических блочных кодов. Пусть многочлен $u(x)$ является порождающим многочленом степени $r - 1$ циклического блочного (N_1, K_1, D_1) -кода РС над $GF(q^p)$. Тогда [15-18]:

$$u(x) = \prod_{y=a}^{a+2t-1} (x - \gamma^y),$$

где t – число исправляемых ошибок (N_1, K_1, D_1) -кодом РС, $N_1 = q^p - 1$, $K_1 = N_1 - \deg u(x)$, $D_1 = 2t + 1$; γ – примитивный элемент поля $GF(q^p)$.

Предположим, что многочлен $w(x)$ является порождающим многочленом степени $h - 1$ циклического блочного (N_0, K_0, D_0) – кода РС над $GF(q^m)$ [18]:

$$w(x) = \prod_{\alpha=a}^{a+2t-1} (x - \alpha^y),$$

где t – число исправляемых ошибок (N_0, K_0, D_0) -кодом РС, $N_0 = q^m - 1$, $K_0 = N_0 - \deg w(x)$, $D_0 = 2t + 1$; α – примитивный элемент поля $GF(q^m)$.

ШАГ 7. Формирование порождающих многочленов $g(x)$ внешней ступени и набора из z порождающих многочленов $g_z^*(x)$ внутренней ступени кодирования алгебраического каскадного сверточного кода. Схемы алгоритмов формирования порождающих многочленов $g(x)$ и $g_z^*(x)$ представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

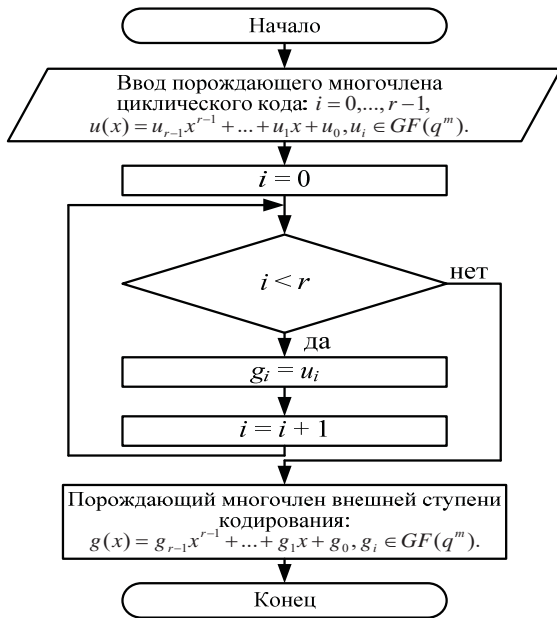


Рис. 2. Схема алгоритма формирования порождающего многочлена внешней ступени алгебраического каскадного сверточного кода

ШАГ 8. Построение схемы кодера алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода.

Схема алгоритма построения алгебраического каскадного сверточного кода представлена на рисунке 3.

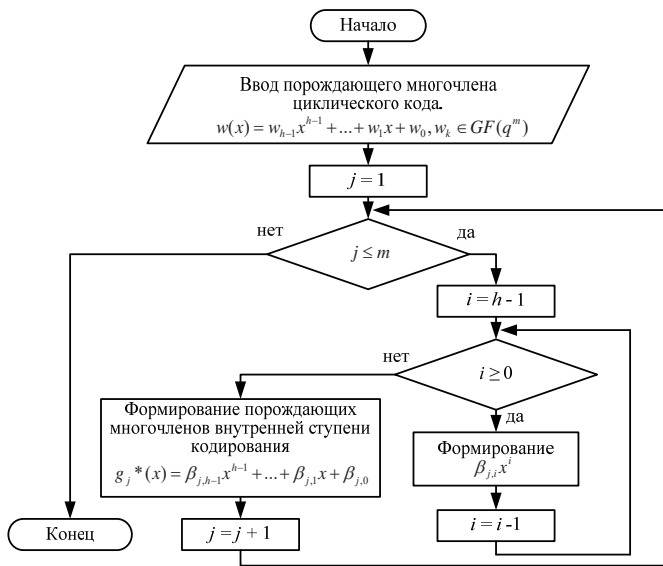


Рис. 3. Схема алгоритма формирования порождающих многочленов внутренней ступени алгебраического каскадного сверточного кода

Для формирования порождающих многочленов алгебраических каскадных сверточных $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кодов можно выбрать недвоичные циклические блочные примитивные или непримитивные коды БЧХ. Выбор кодов РС для построения каскадных $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кодов объясняется их высокими корректирующими способностями [21]. Таким образом, за конечное число шагов возможно построение алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода с параметрами: $k^{(k)} = k^{(1)}$, $n^{(k)} = m$, $v_k = r \cdot k^{(1)} + h \cdot k^{(0)}$, $R_k = R_1 \cdot R_0$.

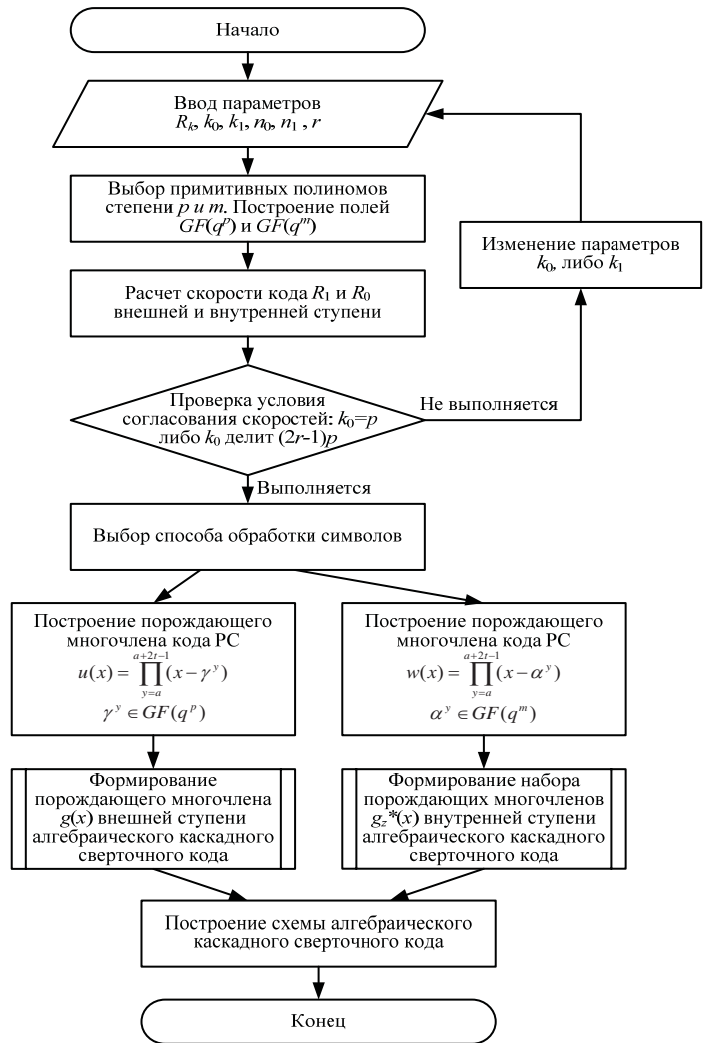


Рис. 4. Схема алгоритма определения алгебраического каскадного сверточного кода

Далее предлагается алгоритм кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов с использованием быстрых процедур вычисления циклической свертки [22]. Данный алгоритм позволит уменьшить число арифметических операций умножений и сложений. Алгоритм кодирования каскадным $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кодом на внешней ступени рассмотрим пошагово.

ШАГ 1. Ввод информационной последовательности $b(x)$, подлежащей кодированию, в кодер внешней ступени.

ШАГ 2. Используя метод перекрытия с суммированием, выполняется разбиение информационной последовательности $b(x)$ на секции конечной длины $\{b^{(1)}(x), b^{(2)}(x), b^{(3)}(x), \dots\}$. Длина каждой секции равна $n - L$. Причем, $L = \deg g(x)$, $n = n' \cdot n'' \geq 2r - 1$, $b_i \in GF(q^p)$, $g_i \in GF(q^p)$, $\deg b^{(l)}(x) = n - L - 1$. Числа n' и n'' – взаимно просты [23-25].

ШАГ 3. Формирование серии циклических сверток для нахождения многочлена $c(x)$ кодового слова внешней ступени для случая бесконечной длины. Каждая из l -тая циклических сверток равна: $c^{(l)}(x) = g(x) \cdot b^{(l)}(x) \text{ mod}(x^n - 1)$.

ШАГ 4. На основе алгоритма Агарвала-Кули [23-25], выполняется преобразование одномерной l -ой циклической свертки в двумерную свертку. Схема алгоритма формирования двумерного кодового слова внешней ступени представлена на рисунке 5.

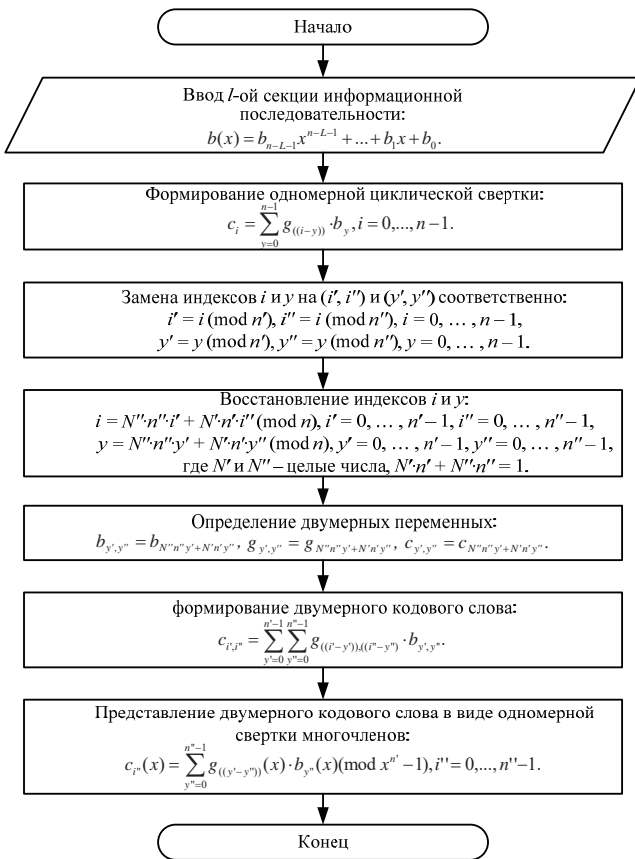


Рис. 5. Схема алгоритма формирования двумерного кодового слова на внешней ступени кодирования

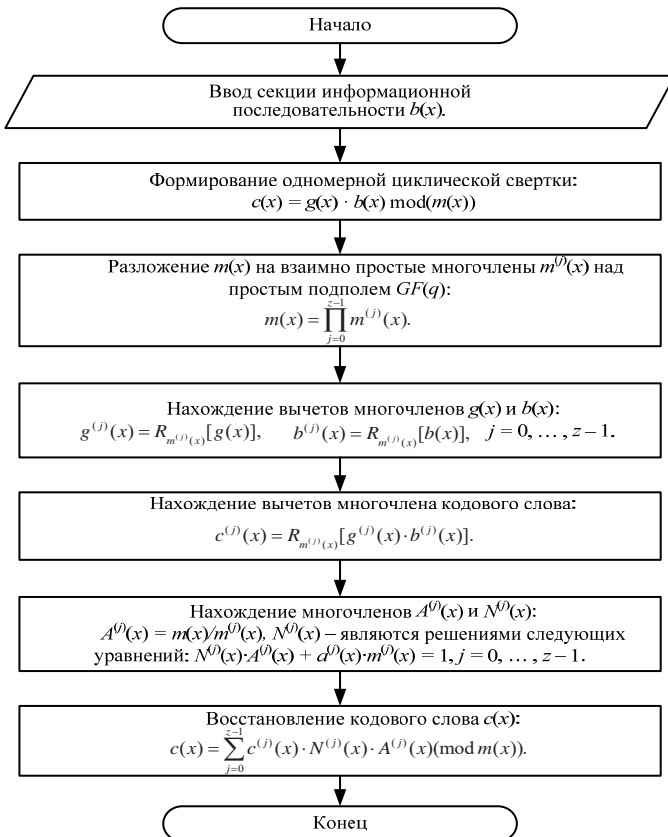


Рис. 6. Схема алгоритма вычисления коротких циклических сверток на внешней ступени кодирования

ШАГ 5. Используя алгоритм Винограда, основанный на китайской теореме об остатках, реализуется вычисление коротких циклических сверток. Схема алгоритма вычисления коротких циклических сверток на внешней ступени кодирования представлена на рисунке 6.

ШАГ 6. Формирование многочлена кодового слова $c(x)$ на внешней ступени алгебраического каскадного сверточного кода, на основе метода перекрытия с суммированием.

На рисунке 7 представлена схема алгоритма кодирования на внешней ступени каскадного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода.

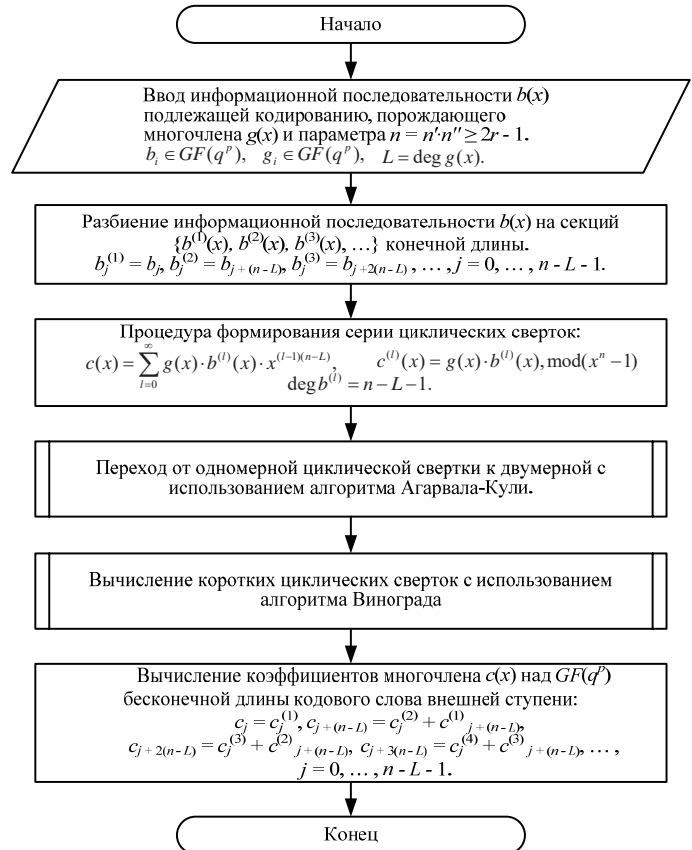


Рис. 7. Схема алгоритма кодирования на внешней ступени алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода

Далее рассмотрим алгоритм кодирования алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода на внутренней ступени.

ШАГ 1. Ввод последовательности $f(x)$ подлежащей кодированию на внутреннюю ступень кодера.

ШАГ 2. Преобразование многочлена $f(x)$ с целью нахождения всех коэффициентов (включая первые H) кодового слова $s(x)$ алгебраического каскадного сверточного кода: $f(x) \cdot x^H$.

ШАГ 3. Разбиение $f(x)$ на секции конечной длины $\{f^{(1)}(x), f^{(2)}(x), f^{(3)}(x), \dots\}$ на основе метода перекрытия с накоплением [22-25]. При этом, $f_i \in GF(q^m), g_i^* \in GF(q^m), H = \deg g^*(x)$.

ШАГ 4. Формирование l -ой циклической свертки кодового слова: $s^{(l)}(x) = g^*(x) \cdot f^{(l)}(x) \pmod{x^n - 1}$.

ШАГ 5. Вычисление l -ой циклической свертки $s^{(l)}(x)$ кодового слова с применением алгоритма Винограда рисунке 8.

ШАГ 6. Вычисление коэффициентов многочлена $s(x)$ кодового слова внутренней ступени кодирования алгебраического каскадного сверточного кода на основе метода перекрытия с накоплением.

Схема алгоритма кодирования на внутренней ступени алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода представлена на рисунке 8.

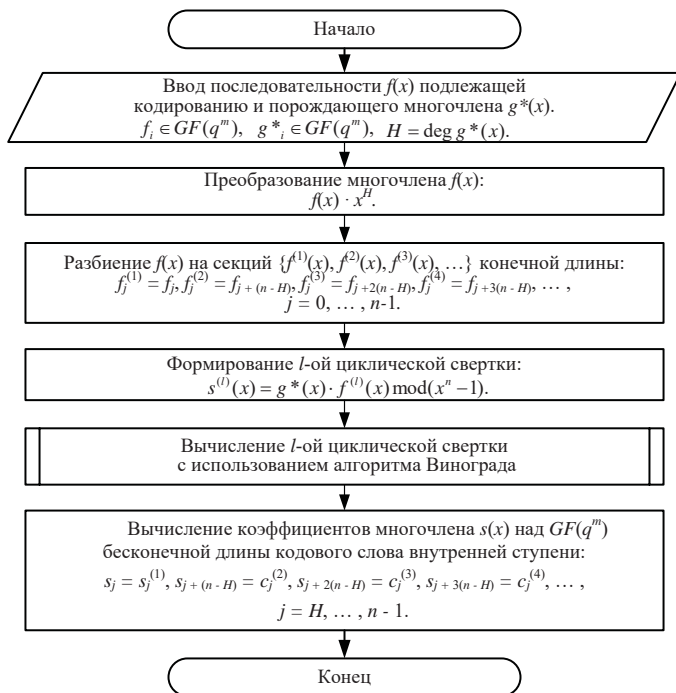


Рис. 8. Схема алгоритма кодирования на внутренней ступени алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ -кода

В общем случае процедура кодирования алгебраических сверточных кодов в составе каскадного предполагает, что длина многочлена информационной последовательности во много раз превышает длину порождающего многочлена. Следовательно, ее можно представить порождающим многочленом бесконечной степени. Это утверждение справедливо для сверточных кодов внешней и внутренней ступени алгебраического каскадного сверточного кода. Тогда, процедура кодирования алгебраическим сверточным кодом эквивалентна вычислению непрерывной недвоичной линейной свертки большой длины (т.е. длина во много раз превышает длину порождающего многочлена).

Согласно предложенным алгоритмам, определим недвоичный алгебраический каскадный сверточный $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – код. Положим, что на внешней и внутренней ступени кодирования заданы алгебраические сверточные коды с обработкой символов над $GF(q^p)$, где $q = b^w$, и над $GF(b^m)$ соответственно. Очевидно, что $GF(b^w)$ является подполем поля $GF(q^p)$. При этом нерекursивный сверточный (n_1, k_1) – код над $GF(q^p)$ в несистематическом виде определяется порождающим многочленом $g(x)$ над $GF(q^p)$ и имеет параметры: $k^{(1)} = \log_q M$, $n^{(1)} = p$, $k_1 = (r + 1) \cdot k^{(1)}$, $n_1 = k_1 \cdot n^{(1)}/k^{(1)}$ и скорость кодирования $R_1 = k^{(1)}/p$. Порождающий многочлен $g^*(x)$ над $GF(b^m)$ определяет нерекursивный сверточный (n_1, k_1) – код над $GF(b^m)$ в несистематическом виде с параметрами: $k^{(0)} = \log_b Q$, $n^{(0)} = m$, $k_0 = (h + 1) \cdot k^{(1)}$, $n_0 = k_0 \cdot n^{(0)}/k^{(0)}$ и скоростью кодирования $R_0 = k^{(0)}/m$.

Для оценки минимального кодового расстояния d_k алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода проведем следующие рассуждения.

Предположим, что на вход кодера внешней ступени $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода поступил кадр информационных символов $k^{(1)}$, который принадлежит множеству M и удовлетворяет следующим условиям: $k^{(1)} = \log_q M \geq 1$, $M \in GF(q^p)$, $p \geq k^{(1)}$. Тогда, с учетом r кадров, хранящихся в памяти кодера внешней ступени, формируется кадр кодового слова $n^{(1)}$, являющийся одним элементом поля $GF(q^p)$.

Пусть число кадров, поступивших на вход сверточного кодера внешней ступени, равно K_1 . Тогда последовательность (секция), состоящая из N_1 кадров кодового слова над $GF(q^p)$, является кодовым словом недвоичного циклического блокового (N_1, K_1, D_1) – кода над $GF(q^p)$ в несистематическом виде [9]. Следовательно, справедливо утверждать, что минимальное кодовое расстояние d_1 одной секции длины N_1 сверточного (n_1, k_1) – кода над $GF(q^p)$ внешней ступени кодирования удовлетворяет выражению $d_1 \geq D_1$ [17, 19]. Далее процедура кодирования реализуется на внутренней ступени $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода.

На вход сверточного кодера внутренней ступени кодирования поступает кадр информационных символов $k^{(0)} = \log_b Q \geq 1$, где $Q \in GF(b^m)$, $m \geq k^{(0)}$, $m > w$. Тогда кадр $k^{(0)}$ будет одним элементом множества Q или элементом поля $GF(b^m)$. Следовательно, формирование кадра кодового слова $n^{(0)}$ происходит с учетом h кадров хранящихся в памяти сверточного кодера внутренней ступени. Причем кадра кодового слова n_0 является одним элементом поля $GF(b^m)$.

Зафиксируем $p = K_0$. Аналогично, если подать K_0 кадров информационных символов на вход сверточного кодера внутренней ступени кодирования, то N_0 кадров кодового слова представляют собой кодовое слово циклического блокового (N_0, K_0, D_0) – кода над $GF(b^m)$, также в несистематическом виде [9]. При этом минимальное кодовое расстояние d_0 сверточного (n_0, k_0) – кода над $GF(b^m)$ на внутренней ступени кодирования одной секции длины N_0 удовлетворяет условию $d_0 \geq D_0$ [17, 19].

В тоже время из теории помехоустойчивого блокового кодирования известно, что при последовательном соединении двух недвоичных блоковых кодов РС в несистематическом виде минимальное кодовое расстояние D_k каскадного блокового кода оценивается как $D_k \geq D_1 \cdot D_0$. Причем длина блока информационного слова каскадного блокового кода $K_k = K_1 \cdot K_0$, а длина блока кодового слова каскадного кода $N_k = N_1 \cdot N_0$ [17, 19].

На основании вышеизложенных рассуждений, можно сделать вывод, что минимальное кодовое расстояние d_k недвоичного алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода можно оценить согласно следующему выражению:

$$d_k \geq d_1 \cdot d_0. \quad (1)$$

При этом отметим, что длину секции информационного и кодового слова алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода можно выразить через параметры недвоичных блоковых кодов РС следующим образом:

$$\begin{cases} k_k = K_1 \cdot K_0, \\ n_k = N_1 \cdot N_0, \end{cases} \quad (2)$$

где k_k – длина секции информационного слова $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода; n_k – длина секции кодового слова $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода.

Известно, что способность блочного кода исправлять t ошибок, можно определить как наибольшее число ошибок, которые блочный код гарантированно может исправить на длине блока кодового слова N [17-19]. При этом минимальное кодовое расстояние блочного кода $D = 2 \cdot t + 1$ [9, 17].

Тогда можно записать: $t_1 = (d_1 - 1)/2$ и $t_0 = (d_0 - 1)/2$, где t_1 и t_0 число исправляемых ошибок алгебраическими сверточными кодами на внешней и внутренней ступени на длине одной секции N_1 и N_0 соответственно [18].

Так как блочный код РС является оптимальным согласно границы Синглтона [9, 10, 17-19], то на основании выше изложенных рассуждений для сверточных кодов в составе алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода справедливы следующие выражения:

$$\begin{cases} d_1 = 2 \cdot t_1 + 1 = N_1 - K_1 + 1, \\ d_0 = 2 \cdot t_0 + 1 = N_0 - K_0 + 1. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, возможно алгебраическим способом выполнить оценку минимального кодового расстояния d_k алгебраических каскадных сверточных $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кодов.

Рассмотрим пример оценки минимального кодового расстояния d_k алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода.

Пример. Предположим, что заданы следующие конечные поля: $GF(2^3)$, $GF(2^4)$ и $GF((2^3)^3)$.

Пусть задан недвоичный блочный код РС над $GF((2^3)^3)$ который исправляет 7 ошибок и имеет следующие параметры: $N_1 = 2^9 - 1 = 511$, $K_1 = 511 - 2 \cdot 7 = 497$, $D_1 = 2 \cdot 7 + 1 = 15$ и степень порождающего многочлена $\deg u(x) = 14$. Тогда, блочный $(511, 497, 15)$ – код РС над $GF((2^3)^3)$ полностью определяет алгебраический сверточный (n_1, k_1) – код над $GF((2^3)^3)$ в несистематическом виде на внешней ступени. При этом (n_1, k_1) – код имеет порождающий многочлен $g(x)$ степени $\deg g(x) = 14$ и следующие параметры: $k^{(1)} = 2$, $n^{(1)} = 3$, $k_1 = 30$, $n_1 = 45$, $v_1 = 28$, $R_1 = 2/3$, $d_1 \geq 15$.

Далее пусть задан код РС над $GF(16)$ исправляющий 6 ошибок, который имеет следующие параметры: $N_0 = 2^4 - 1 = 15$, $K_0 = 3$, $D_0 = 2 \cdot 6 + 1 = 13$ а степень порождающего многочлена $\deg w(x) = 12$. Следовательно, $(15, 3, 13)$ – код РС над $GF(2^4)$ определяет алгебраический сверточный (n_0, k_0) – код над $GF(2^4)$ на внутренней ступени каскадного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода. Тогда сверточный (n_0, k_0) – код будет иметь параметры: $k^{(0)} = 3$, $n^{(0)} = 4$, $k_0 = 39$, $n_0 = 52$, $v_0 = 36$, $R_0 = 3/4$, $d_0 \geq 13$ и порождающий многочлен $g^*(x)$ степени $\deg g^*(x) = 12$.

Таким образом, согласно выражению (1), минимальное кодовое расстояние d_k алгебраического каскадного сверточного $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода $d_k \geq 195$. При этом длина секции информационного слова $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – кода $k_k = 1491$, а длина секции кодового слова $n_k = 7665$.

Из примера видно, что за фиксированное число шагов удастся задать недвоичный алгебраический каскадный сверточный $(n^{(k)}, k^{(k)})$ – код с высоким значением минимального кодового расстояния $d_k \geq 195$ и с заранее заданными параметрами компонентных алгебраических сверточных кодов.

В ряде известных схем последовательного каскадного кодирования в качестве компонентных кодов используют сверточные коды, найденные переборным методом. Тогда число всех возможных компонентных сверточных кодов внешней и внутренней ступени, с длиной кодового ограни-

чения v_1 и v_0 соответственно, можно рассчитать следующим образом: $W = q_1^{v_1} + q_0^{v_0}$ [17].

Далее оценивают минимальное кодовое расстояние d найденных сверточных кодов и каскадного кода в целом. Зачастую, при больших длинах кодового ограничения ($v \geq 10$) данная задача практически неразрешима [14].

Например, при значениях $v_1 = 28$, $v_0 = 36$ и $q_1 = 2^9$, $q_0 = 2^4$ число всех возможных компонентных сверточных кодов составляет $W = (2^9)^{28} + (2^4)^{36}$. Очевидно, что перебрать такое число кодирующих устройств (как правило, это схемы, основанные на регистрах сдвига [17]) сверточных кодов в настоящее время затруднительно. Это доказывает, что способ определения сверточных каскадных кодов, основанных на поиске компонентных кодов переборным методом, является малоэффективным.

Применение быстрых алгоритмов вычисления свертки Агарвала-Кули и Винограда [17, 23-25] целесообразно использовать на внешней ступени кодирования недвоичного алгебраического каскадного сверточного кода. Это дает возможность уменьшить число арифметических операций в поле $GF(q^p)$ при вычислении многочлена кодового слова $c(x)$.

Для уменьшения числа арифметических операций в поле $GF(q^m)$ на внутренней ступени рекомендуется использовать быстрый алгоритм Винограда вычисления свертки. Это связано с тем, что на внутренней ступени кодирования, как правило, рекомендуют использование кодов с меньшей длиной кодового ограничения и построенных над полем с меньшей степенью расширения по сравнению с кодами внешней ступени [23-25].

Следовательно, выражения для оценки вычислительной сложности метода кодирования на основе синтеза методов Агарвала-Кули и Винограда можно представить следующим образом [20-22]:

$$M(n) = M(n') \cdot M(n''); \quad (4)$$

$$A(n) = n' \cdot A(n'') + M(n'') \cdot A(n').$$

В выражении (4) $M(n')$ и $M(n'')$ – мультипликативная сложность вычисления n' и n'' точечных сверток соответственно, а $A(n')$ и $A(n'')$ – аддитивная сложность вычисления n' и n'' точечных сверток, которые определяются вычислительной сложностью метода Винограда, а именно [23-25]:

$$M(n^*) \approx A(n^*) \approx \sum_{j=0}^{z-1} [\deg m^{(j)}(x)]^2, \quad (5)$$

где $M(n^*)$ и $A(n^*)$ – число арифметических операций умножений и сложений соответственно для одного из измерений [17].

Согласно выражениям вида (4), основной объем вычислений приходится на вычисление n' и n'' точечных сверток. При вычислении сверток выражение (5) является верхней границей числа операций. Так, например, для сверточного кода внешней ступени при $n = 255$ сложность $M(255) = M(15) \cdot M(17) = 6837$. В то же время для вычисления прямым способом кодового слова сверточного кода внешней ступени понадобится $M(255) = 15876$ операций умножений при длине кодового ограничения сверточного кода, равной $1/2n$.

Таким образом, удается сократить вычислительную сложность сверточного кода внешней ступени при $n = 255$ в 2,32 раза. Для сверточного кода внутренней ступени при $n = 15$ сложность $M(15) = M(3) \cdot M(5) = 53$, а при вычислении прямым способом необходимо выполнить 64 арифметических операций умножений. Следовательно, вычислительную сложность сверточного кода внутренней ступени при $n = 15$ удается сократить в 1,21 раза [17].

Выводы

Разработан алгоритм формирования порождающих многочленов внешней и внутренней ступени, отличающийся от известных возможностью однозначно определять алгебраические каскадные сверточные коды с заранее заданными параметрами и произвольными длинами кодовых ограничений за фиксированное количество шагов. Данный алгебраический подход формирования порождающих многочленов внешней и внутренней ступени позволяет уменьшить сложность поиска новых кодовых конструкций и позволит строить помехоустойчивые сверточные коды большой длины для систем связи следующего поколения.

Разработаны алгоритмы кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов, отличающийся от известных, новым подходом использования быстрых алгоритмов вычисления циклической свертки на каждой из ступеней. Для нахождения многочленов кодовых слов $c(x)$ и $s(x)$, длины порождающих и информационных многочленов – соизмеримы с длинами циклических сверток на внешней и внутренней ступени соответственно. Разработанные алгоритмы позволяют уменьшить вычислительную сложность процедуры кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов на каждой из ступеней.

Для оценки вычислительной сложности алгоритма кодирования на основе синтеза алгоритмов Агарвала-Кули и Винограда представлены соответствующие выражения для компонентных алгебраических сверточных кодов на каждой из ступени.

Литература

1. *Форни Д.* Каскадные коды. М.: Мир, 1970. 207 с.
2. *Forney G.D.* Generalized minimum distance decoding // IEEE transactions on information theory. 1966. № 12, pp. 125-131.
3. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г.* Анализ эффективности и сложности демодуляции с использованием негауссовской аппроксимации в системах massive MIMO // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 2. С. 77-92.
4. *Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д.* Анализ быстрого алгоритма умножения матриц и векторов для банка цифровых фильтров // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 4-10.
5. *Казак П.Г., Шевцов В.А.* Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного

доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158239>

6. *Богданов А.С., Шевцов В.А.* Передача обслуживания по сигналам локальной радионавигационной сети // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26041>

7. *Богданов А.С., Шевцов В.А.* Выбор способа синхронизации в имитационной модели адаптивных алгоритмов определения местоположения и управления // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63136>

8. *Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А.* Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93398>

9. *Блох Э.Л., Зяблов В.В.* Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.

10. *Блох Э.Л., Зяблов В.В.* Линейные каскадные коды. М.: Наука, 1982. 229 с.

11. *Зяблов В.В., Шавгулидзе С.А.* Обобщенные каскадные помехоустойчивые конструкции на базе сверточных кодов. М.: Наука, 1991. 207 с.

12. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.

13. *Виттерби А.Д.* Принцип цифровой связи и кодирования. М.: Радио и связь, 1982. 536 с.

14. *Волков А.С.* Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ: сетевое научное издание. М.: МАИ, 2023. №128. 31 с.

15. *Волков А.С., Солодков А.В., Сулова К.О., Стрельников А.П.* Прототипирование помехоустойчивых кодов в системах связи с кодовым разделением канала // Труды МАИ: сетевое научное издание. М.: МАИ, 2021. №119. 27 с.

16. *Волков А.С., Солодков А.В., Цимляков Д.В.* Разработка программно-аппаратного стенда для исследования характеристик полярных кодов // Труды МАИ: сетевое научное издание. М.: МАИ, 2021. № 116. 22 с.

17. *Blahut R.* Algebraic codes on lines, planes and curves. Cambridge: Cambridge university press, 2008. 543 p.

18. *Берлекэмп Э.* Алгебраическая теория кодирования. М.: Мир, 1971. 477 с.

19. *Питерсон В., Уэлдон Э.* Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 576 с.

20. *Johannesson R., Zigangirov K. Sh.* Fundamentals of convolutional coding. New York: IEEE Press, Inc, 1983. 428 p.

21. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

22. *Höst S., Sidorenko V.R.* Some structural properties of cascaded convolutional codes // Algebraic and combinatorial coding theory. 1996, pp. 146-150.

23. *Трифонов П.В., Сидоренко С.В.* Методы быстрого вычисления преобразования Фурье над конечным полем // Проблемы передачи информации. 2003. Т. 39. №3. С. 3-10.

24. *Nussbaumer H., Quandalle P.* Fast computation of discrete Fourier transform using polynomial transform // IEEE ASSP. 1979. Vol. 27. №2, pp. 169-181.

25. *Зяблов В.В.* Оптимизация алгоритмов каскадного декодирования // Проблемы передачи информации. 1973. Т. 9. № 1. С. 26-32.

ALGORITHMS FOR ENCODING ALGEBRAIC NON-BINARY CONCATENATED CONVOLUTIONAL CODES REDUCED COMPLEXITY

Alexey S. Volkov, Ph.D, associate professor, department of telecommunication systems National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia, leshvol@mail.ru

Vitaly B. Kreyndelin, Doctor of sciences, professor, head of the department of "Theory of Electric Circuits" "Moscow Technical University of Communications and Informatics", Moscow, Russia, v.b.kreindelin@mtuci.ru

Abstract

To provide high reliability of transmitted information in wired and wireless telecommunication systems and networks, error correction codes are used. It is possible to achieve high reliability with a relatively low complexity of encoding and decoding algorithms through the use of concatenated codes. A cascade code is a code structure based on the sequential connection of several component error correction codes. From a practical point of view, concatenated codes with two coding stages are of greatest interest. One coding stage is called outer, and the other called inner. The paper proposes an algorithm for constructing of generator polynomial of the outer and inner stages, which make it possible to determine algebraic concatenated convolutional codes with pre-determined parameters and variable constraint length in a fixed number of steps. Encoding algorithms for algebraic concatenated convolutional codes have been designed based on fast algorithms for calculating cyclic convolution at each stage and to find polynomials of code words $c(x)$ and $s(x)$ the lengths of generator and information polynomials are matched with the lengths of cyclic convolutions on the outer and internal stage, respectively. It is suggested to use the fast algorithms Agarwal-Cooley and Winograd for computation the convolution at the outer coding stage of a non-binary algebraic concatenated convolutional code. This makes it possible to reduce the number of arithmetic operations in the $GF(q^p)$ field when calculating the codeword polynomial $c(x)$. To reduce the number of arithmetic operations in the $GF(q^m)$ field at the inner stage, it is proposed to use the fast Winograd algorithm for calculating convolution. This is due to the fact that it's recommended at the inner coding stage to choose codes with a short code constraint length and over smaller fields, compared to codes at the outer stage. To estimate the computational complexity of the proposed encoding algorithm based on the synthesis of the Agarwal-Cooley and Winograd algorithms, the analytic expressions for component algebraic convolutional codes at each stage are presented.

Keywords: error-correction codes, convolutional codes, construction of convolutional codes, computational complexity, generator polynomial, concatenated codes.

References

1. D. Forni, "Concatenated Codes," Moscow: Mir, 1970. 207 p.
2. G.D. Forney, "Generalized minimum distance decoding," *IEEE transactions on information theory*. 1966. No. 12, pp. 125-131.
3. M.G. Bakulin, V.B., Kreyndelin, D.Yu. Pankratov, A.G. Stepanova, "Analysis of the efficiency and complexity of demodulation using non-Gaussian approximation in a massive MIMO," *Informatsionnye processy*. 2022. Vol. 22. No.2, pp. 77-92.
4. V.B. Kreyndelin, Ye.D. Grigor'yeva, "Analysis of a fast algorithm for matrix and vector multiplication for a digital filters bank," *T-Comm*. 2021. Vol. 15. No. 1, pp. 4-10.
5. P.G. Kazak, V.A. Shevtsov, "Principles for building an energy-efficient cellular communication system and wireless broadband Internet access for the Arctic area," *Trudy MAI*. 2021. No.118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158239>
6. A.S. Bogdanov, V.A. Shevtsov, "Transfer of service using local radio navigation network signals," *Trudy MAI*. 2011. No.46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26041>
7. A.S. Bogdanov, V.A. Shevtsov, "Synchronization in the simulation model of adaptive algorithms for positioning and control," *Trudy MAI*. 2015. No.84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63136>
8. V.V. Borodin, A.M. Petrakov, V.A. Shevtsov, "Simulation model for adaptive sensor networks studies," *Trudy MAI*. 2018. No.100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93398>
9. E.L. Blokh, V.V. Zyablov, "Generalized concatenated codes," Moscow: Svyaz', 1976. 240 p.
10. E.L. Blokh, V.V. Zyablov, "Linear concatenated codes," Moscow: Nauka, 1982. 229 p.
11. V.V. Zyablov, S.A. Shavgulidze, "Generalized concatenated modulation and coding schemes based on convolution codes," Moscow: Nauka, 1991. 207 p.
12. R. Morelos-Saragosa, "The art of error correcting coding," Moscow: Tekhnosfera, 2005. 320 p.
13. A.D. Viterbi, "Principles of digital communication and coding," Moscow: Radio i svyaz', 1982. 536 p.
14. A.S. Volkov, "The development of simulation model of channel with burst error arrays," *Trudy MAI: setevoye nauchnoye izdaniye*. Moscow: MAI, 2023. No. 128. 31 p.
15. A.S. Volkov, A.V. Solodkov, K.O. Suslova, A.P. Strel'nikov, "Prototyping error correction codes in communication systems with channels code division," *Trudy MAI: setevoye nauchnoye izdaniye*. Moscow: MAI, 2021. No. 119. 27 p.
16. A.S. Volkov, A.V. Solodkov, D.V. Tsimlyakov, "Development of a software and hardware stand for studying the characteristics of polar codes," *Trudy MAI: setevoye nauchnoye izdaniye*. Moscow: MAI, 2021. No. 116. 22 p.
17. R. Blahut, "Algebraic codes on lines, planes and curves," Cambridge: Cambridge university press, 2008. 543 p.
18. E. Berlekemp, "Algebraic coding theory," Moscow: Mir, 1971. 477 p.
19. U. Peterson, E. Ueldon, "Error-correcting codes," Moscow: Mir, 1976. 576 p.
20. R. Johannesson, K.Sh. Zigangirov, "Fundamentals of convolutional coding," New York: IEEE Press, Inc, 1983. 428 p.
21. B. Sklyar, "Digital communications: fundamentals and applications," Moscow: Izdat. dom "Vil'yams", 2003. 1104 p.
22. S. Host, V.R. Sidorenko, "Some structural properties of cascaded convolutional codes," *Algebraic and combinatorial coding theory*. 1996, pp. 146-150.
23. P.V. Trifonov, S.V. Fedorenko, "Methods of fast Fourier transform computation over finite field," *Problemy peredachi informatsii*. 2003. Vol. 39. No.3, pp. 3-10.
24. H. Nussbaumer, P. Quandalle, "Fast computation of discrete Fourier transform using polynomial transform," *IEEE ASSP*. 1979. Vol. 27. No.2, pp. 169-181.
25. V.V. Zyablov, "Optimization of concatenated decoding algorithms," *Problemy peredachi informatsii*. 1973. Vol. 9. No. 1, pp. 26-32.

Information about authors:

Alexey S. Volkov, Ph.D, associate professor, department of telecommunication systems National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia

Vitaly B. Kreyndelin, Doctor of sciences, professor, head of the department of "Theory of Electric Circuits" "Moscow Technical University of Communications and Informatics", Moscow, Russia

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ ТРАФИКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗЛА SDN ПО ПРОТОКОЛУ OPEN FLOW

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-19-26

Буранова Марина Анатольевна,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,
m.buranova@psuti.ru

Карташевский Вячеслав Григорьевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,
v.kartashevskiy@psuti.ru

Manuscript received 11 February 2024;
Accepted 14 March 2024

Ключевые слова: модель очереди, SDN, качество обслуживания (QoS), среднее время обслуживания заявки в системе, корреляция интервалов времени, гиперэкспоненциальное распределение

Постоянно увеличивающиеся объёмы передаваемого трафика обусловили появление новых инфокоммуникационных технологий, которые предназначены для улучшения качественных показателей (QoS) работы сетевых узлов. Одной из таких технологий является технология использования программно-определяемых сетей (SDN), которая подразумевает разделение плоскости маршрутизации и коммутации трафиковых потоков. При этом анализ работы любого сетевого узла должен проводиться с учётом конструктивных особенностей указанного разделения и с учётом корреляционных свойств трафика (в частности, корреляции интервалов времени между поступающими на обработку пакетами), появление которых обусловлено объединением множества изменчивых ON/OFF источников, механизмами управления такими источниками, появлением новых сервисов и приложений и другими причинами, связанными с особенностями используемых протоколов. В работе дан анализ влияния корреляции интервалов времени между поступающими пакетами на работу узла программно-конфигурируемой сети, функционирующей по протоколу Open Flow. Получены аналитические выражения для расчета средних значений времени задержки пакета в узле сети и вариации этой задержки. При этом аналитическая модель узла сети описывается системой G/G/1, в которой плотности вероятностей интервалов времени между поступающими пакетами и интервалов времени обработки пакетов задаются гиперэкспоненциальными моделями, причём модель для плотности интервалов времени между пакетами учитывает корреляционные связи соседних интервалов. Дано сравнение среднего времени задержки в узле и вариации задержки при наличии и отсутствии корреляции.

Информация об авторах:

Буранова Марина Анатольевна, Профессор кафедры информационной безопасности, д.т.н., доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

Карташевский Вячеслав Григорьевич, Профессор кафедры информационной безопасности, д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

Для цитирования:

Буранова М.А., Карташевский В.Г. Анализ влияния корреляции трафика на характеристики функционирования узла SDN по протоколу Open Flow // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 19-26.

For citation:

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G. (2024). Analysis of the influence of traffic correlation on the performance characteristics of an SDN node using the Open Flow protocol. *T-Comm*, vol. 18, no.3, pp. 19-26. (in Russian)

Введение

Цифровизация инфокоммуникационной сферы дала возможность пользователям применять технологии и сервисы, использование которых привело к глобальному росту объёмов передаваемых данных. Это потребовало разработки технологий передачи данных с высокими скоростями и с малыми задержками сообщений в сетевых узлах.

Объём мирового трансграничного интернет-трафика показывает постоянный рост в среднем более чем на 30% в год в течение последних пять лет [1]. Огромное количество интеллектуальных облачных приложений, которые взаимодействуют с «вещами» по различным физическим сетям и протоколам связи, способствует повышению сложности систем Интернета вещей (IoT). Разнообразие требований конечных пользователей, связанных с объемом генерируемых данных, их разнообразием и скоростью их передачи, делает обеспечение качества обслуживания (QoS) еще более важным и сложным в IoT. Кроме того, необходимо учесть тенденцию к росту потребностей в услугах удаленного доступа, который увеличился в последнее время (в условиях пандемии) благодаря глобальным мерам социального дистанцирования, и продолжает быть востребованным по сей день. Это требует разработки новых подходов в управлении современными сетями связи, новых подходов и методик их проектирования. В последние годы решение вопросов, связанных с управлением, направлено на его централизацию [2]. Например, в [1] показано, что современная сетевая архитектура, решая проблему централизации управления фиксированными и мобильными сетями, должна содержать центральный программный комплекс (пакетное ядро сети), основанный на масштабируемой серверной платформе. Основные исследования данной проблемы ориентированы на разработку программируемых сетей с централизованным управлением и на виртуализацию. На данном этапе развития сетей связи при внедрении программируемых сетей с централизованным управлением, как правило, имеют в виду технологию Software-defined networking (SDN, программно-определяемые сети) [3, 4].

Проблемы, возникающие на уровне поставщиков услуг из-за значительного увеличения подключенных устройств, объемов и характера обрабатываемого трафика, различных требований пользователей и услуг (как правило, в качестве параметров, определяющих качество предоставления таких услуг, рассматривается задержка, вариация задержки, пропускная способность и т. д.), при принятии SDN в качестве новой сетевой парадигмы предполагается решить за счёт разделения плоскости маршрутизации и коммутации трафиковых потоков.

Как показано в [5-7], несмотря на преимущества в гибкости управления сетью по сравнению с традиционными сетями, SDN по-прежнему требует разработки надежных методик, позволяющих быстро получить оценки параметров качества обслуживания (QoS). В связи с этим возникает необходимость в разработке аналитической модели SDN, при этом, учитывая характер обрабатываемых потоков, требуется разработка модели для системы общего вида - G/G/1.

Часто данные задачи решаются посредством применения методов имитационного моделирования. Разработке аналитических моделей SDN посвящен ряд работ [5, 8-10], где главным образом исследуются модели с обработкой экспоненциальных потоков.

При построении аналитических моделей функционирования программно-определяемых сетей, которые учитывают параметры качества обслуживания, решение вопросов, связанных с производительностью и масштабированием, вызывает определенные трудности. Весьма распространенным вариантом, позволяющим решить проблемы анализа функционирования SDN, является вариант, основанный на использовании имитационного моделирования, что позволяет получить достаточно точные оценки параметров функционирования инфокоммуникационных сетей. Естественно, искомые оценки могут быть получены в результате проведения экспериментов на реальных сетях. Но, когда речь идет о разработке новой сети или о реконструкции и модернизации уже функционирующей сети, необходимы исследования, проведенные на аналитических моделях с возможно более полным учётом свойств трафика, который будет обрабатываться в узлах проектируемой сети с учётом особенностей протокола, на основе которого разрабатываемая сеть будет функционировать.

Ниже рассматривается аналитическая модель узла SDN, функционирующей по протоколу Open Flow, как система G/G/1. Для анализа системы G/G/1, обрабатывающей пакетный трафик, плотности вероятностей интервалов времени между поступающими пакетами и интервалов времени обработки пакетов аппроксимируются гиперэкспоненциальной моделью, естественно с разными параметрами. Отличительной особенностью данного рассмотрения является аналитический учёт корреляции, возникающей в узле SDN между указанными потоками временных интервалов.

Модель SDN как СМО G/G/1

Аналогично подходу, показанному в [5-7], рассмотрим модель обработки пакетного трафика в SDN. Модель включает в себя анализ процесса обработки пакетов в узле SDN, который в свою очередь включает обработку поступающего потока пакетов и процедуру пересылки пакетов коммутатором и контроллером в SDN на основе протокола OpenFlow.

Как известно, процесс обработки потока пакетов в узле SDN на основе протокола OpenFlow может быть реализована по двум сценариям: первый – пересылка через коммутатор SDN без участия контроллера, второй – пересылка пакетов с анализом в контроллере. Данную процедуру можно описать в виде схемы, показанной на рисунке 1.

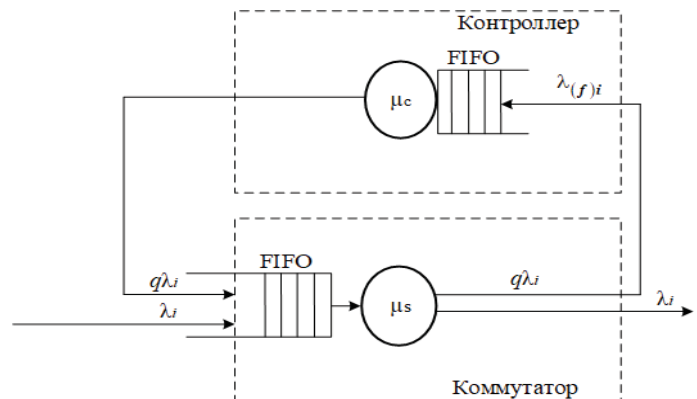


Рис. 1. Обработка входящих сообщений узлом SDN

Поскольку модель включает в себя анализ пересылки пакетов коммутатором OpenFlow на контроллер, необходимо более детально определить последовательность этапов такой обработки пакетов. Процедура пересылки потока пакетов на контроллер SDN на основе протокола OpenFlow включает следующее: каждый вновь поступающий пакет (поток) анализируется коммутатором и, если для пакета нет правила пересылки, информация о пакете (пакет-запрос) перенаправляется контроллеру для установления правил настройки обработки потока пакетов. Учитывая это, можно считать, что поступление пакетов из коммутатора в контроллер соответствует поступлению пакетов на коммутатор. В общем случае в SDN на основе протокола OpenFlow один контроллер может отвечать за несколько коммутаторов, а, следовательно, получает поток пакетов-запросов от каждого коммутатора, входящего в его зону контроля. Пакеты-запросы обслуживаются в контроллере согласно дисциплине очереди FIFO (First In – First Out).

Предположим, что поток пакетов, которые поступают на i -й коммутатор, является простейшим. Очевидно, как в работе [5], что данный поток является пуассоновским с параметром распределения $\lambda_{(f)i}$, на k обслуживаемых коммутаторах процессы поступления пакетов независимыми, и общий поток запросов к контроллеру является пуассоновским.

Из этого следует, что, при данном предположении, в контроллере SDN на основе протокола OpenFlow, отвечающим за k коммутаторов, процесс поступления потока пакетов от k коммутаторов соответствует распределению Пуассона, имеющего параметр $\lambda_{(c)}$

$$\lambda_{(c)} = \sum_{i=1}^k \lambda_{(f)i}. \quad (1)$$

Обозначим через W_i – время обработки пакета в i -ом коммутаторе. Как было показано выше, есть два возможных сценария обработки пакета: без обработки в контроллере и с обработкой в контроллере. Данный факт необходимо учесть при оценивании времени пребывания пакета в узле SDN. Во втором случае, с обработкой в контроллере, время задержки пакета будет включать в себя два этапа: обработка в коммутаторе с временем $W_{(s)i}$, а затем обработка в контроллере с временем $W_{(c)}$. Поэтому

$$W_i = \begin{cases} W_{(s)i} & \text{с вероятностью } 1 - q_i \\ W_{(s)i} + W_{(c)} & \text{с вероятностью } q_i. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая формулу (1) и схему пересылки пакетов, показанную на рисунке 1, обозначим оценку среднего времени обработки пакета в узле SDN на основе протокола OpenFlow как \bar{W}_i . Плотность вероятностей времени обработки пакета в узле SDN на основе протокола OpenFlow можно представить в виде выражения:

$$w_{(s,c)i}(u) = (1 - q_i) f_{(s)i}(u) + q_i [f_{(s)i}(u) \odot f_{(c)}(u)], \quad (3)$$

здесь \odot – символ свёртки.

Решение (3) может быть получено при известных распределениях $f_{(s)i}(u)$ и $f_{(c)}(u)$.

Очевидно, если времена ожидания в коммутаторе и контроллере есть $W_{(s)i}$ и $W_{(c)}$ соответственно, то выражение для определения среднего времени обработки пакетов \bar{W}_i в узле SDN будет иметь вид

$$\bar{W}_i = E[W_i] = (1 - q_i) E[W_{(s)i}] + q_i (E[W_{(s)i}] + E[W_{(c)}]) \quad (4)$$

В работах [6, 7] были представлены результаты в виде аналитических выражений для получения оценок таких параметров как задержка, вариация задержки, длина очереди в узле SDN для случая, когда поступление и обработка пакетов независимы друг от друга.

Оценивание параметров QoS в SDN на основе Open Flow для некоррелированной очереди

На основе выражения (4) рассмотрим характеристики узла SDN как системы G/G/1.

Обозначим через $\delta_i = 1/\bar{W}_{(s)i}$ параметр плотности распределения времени обработки в очереди в i -м коммутаторе и $\delta_{(c)} = 1/\bar{W}_{(c)}$ – соответствующий параметр распределения времени обработки очереди в контроллере. Определить параметры $\delta_i = 1/\bar{W}_{(s)i}$ и $\delta_{(c)} = 1/\bar{W}_{(c)}$ можно согласно методике, приведённой в [11].

В работах [6, 7] были получены результаты для случая независимости временных интервалов поступлений и обработки входящих пакетов.

Для случая, когда произвольные распределения вероятностей для времен обработки запросов в контроллере и коммутаторе аппроксимируются гиперэкспоненциальными распределениями для плотностей можно записать:

$$f_{(s)i}(u) = p \delta_{1i} e^{-\delta_{1i} u} + (1 - p) \delta_{2i} e^{-\delta_{2i} u}, \quad (5)$$

где p , δ_{1i} , δ_{2i} – параметры распределения времени обработки заявки в коммутаторе.

$$f_{(c)}(u) = g \delta_{(c)1} e^{-\delta_{(c)1} u} + (1 - g) \delta_{(c)2} e^{-\delta_{(c)2} u}, \quad (6)$$

где g , $\delta_{(c)1}$, $\delta_{(c)2}$ – параметры плотности распределения времени обработки заявки в контроллере.

Формулы (5) и (6) означают, что система G/G/1 в данном случае аппроксимируется системой $H_2/H_2/1$, что используется довольно часто [7, 12] и при наблюдении независимости интервалов времени внутри потоков поступления и обработки пакетов подтверждено статистическим моделированием.

Тогда из (3) для плотности вероятностей времени обработки заявки в узле SDN, моделируемым системой $H_2/H_2/1$, можно получить

$$w_{(s,c)i}(u) = (1 - q_i) (p \delta_{1i} e^{-\delta_{1i} u} + (1 - p) \delta_{2i} e^{-\delta_{2i} u}) + q_i [(A + B) \delta_{(c)1} e^{-\delta_{(c)1} u} + (L + D) \delta_{(c)2} e^{-\delta_{(c)2} u}], \quad (7)$$

$$\text{где } A = \frac{pg\delta_{li}}{\delta_{li} - \delta_{(c)1}}, B = \frac{(1-p)g\delta_{2i}}{\delta_{2i} - \delta_{(c)1}}, L = \frac{p(1-g)\delta_{li}}{\delta_{li} - \delta_{(c)2}},$$

$$D = \frac{(1-p)(1-g)\delta_{2i}}{\delta_{2i} - \delta_{(c)2}}.$$

Функция плотности вероятностей согласно (7) будет иметь вид, показанный ниже на рисунке 2 сплошной линией для следующих значений: $q_i = 0,2$, $p = 0,7$, $g = 0,75$, $\delta_{li} = 1,9$, $\delta_{2i} = 2,7$, $\delta_{(c)1} = 5$, $\delta_{(c)2} = 2,3$.

Используя формулу (7), можно получить выражения для среднего времени обработки заявки $\overline{W}_{(S,C)i}$, средней длины очереди \overline{L} и вариации задержки $\sigma_{(S,C)i}$ в узле программно-определяемой сети, моделируемой системой $H_2/H_2/1$, в следующем виде:

$$\overline{W}_{(S,C)i} = (1-q_i) \left[\frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[\frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right]. \quad (8)$$

$$\overline{L} = \lambda_i \left\{ (1-q_i) \left[\frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[\frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right] \right\}. \quad (9)$$

$$\sigma_{(S,C)i} = \sqrt{ \left[(1-q_i) \left[\frac{2p}{\delta_{li}^2} + \frac{2(1-p)}{\delta_{2i}^2} \right] + q_i \left[\frac{2(A+B)}{\delta_{(c)1}^3} + \frac{2(L+D)}{\delta_{(c)2}^3} \right] - \left\{ (1-q_i) \left[\frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[\frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right] \right\}^2 } \quad (10)$$

Известно [13], что повысить точность аппроксимации распределений, описывающих систему $G/G/1$, в случае, когда эти распределения имеют «тяжелые хвосты», можно, переходя к системе $H_L/H_K/1$. Если ввести обозначения

$$a_l = p_l \delta_{li},$$

$$m_k = g_k \delta_{(c)k},$$

то при использовании аппроксимации $H_L/H_K/1$ вместо выражения (7) можно записать

$$w_{(S,C)i}(u) = (1-q_i) \sum_{l=1}^L p_l \delta_{li} e^{-\delta_{li} u} + q_i \sum_{k=1}^K \alpha_{kL}, \quad (11)$$

$$\text{где } \alpha_{kL} = m_k e^{\delta_{(c)k} u} \sum_{l=1}^L \frac{a_l}{\delta_{li} - \delta_{(c)k}}.$$

При этом формулы (8-10), соответственно, преобразуются к виду

$$\overline{W}_{(S,C)i} = (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}}, \quad (12)$$

$$\overline{L} = \lambda_i \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}} \right\}, \quad (13)$$

$$\sigma_{(S,C)i} = \sqrt{ \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{2p_l}{(\delta_{li})^2} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{2\alpha_{kL}}{(\delta_{(c)k})^3} \right\} - \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}} \right\}^2 } \quad (14)$$

Оценивание параметров QoS в SDN на основе OpenFlow для коррелированной очереди

Традиционно построение моделей функционирования инфокоммуникационных сетей, в том числе и аналитических, строится на предположении о марковском характере процессов поступления и обработки пакетов в узле SDN при независимости обрабатываемых потоков, а также при отсутствии корреляций в очереди [13-15].

Существуют работы, например [5], где приведены результаты анализа параметров качества обслуживания пакетов в узле SDN с учетом того, что временные интервалы между пакетами распределены экспоненциально, а временные интервалы обработки пакетов могут иметь произвольное распределение, что соответствует модели $M/G/1$. В работе [5] для плотности вероятностей интервалов времени обработки использовано гауссовское распределение.

Во всех работах анализируются такие параметры качества обслуживания (QoS – Quality of Service) как задержка, вариация задержки и длина очереди. Предположение об отсутствии корреляции в очереди может привести к излишне оптимистическим результатам, которые не будут соответствовать наблюдаемым на практике в следствии того, что потоки, обрабатываемые на современных сетях связи, не являются простейшими. В них наблюдаются свойства самоподобия, а, следовательно, – наличие «тяжелых хвостов» распределений и корреляционных связей между временными последовательностями внутри процессов поступления и обработки пакетов. Данный факт подтверждается многочисленными исследованиями структуры инфокоммуникационного трафика [12, 16, 17].

Ранее в некоторых исследованиях [16, 18, 19] рассматривались модели очередей, учитывающие наличие зависимостей временных интервалов. Но данные модели построены с учетом того, что сами обслуживаемые потоки являются простейшими, интервалы обслуживания пакетов и интервалы между пакетами имеют экспоненциальное распределение, что не подтверждается современными исследованиями структур трафика [16, 17, 20-22].

Очевидно, что в аналитических моделях функционирования SDN на основе протокола OpenFlow необходимо учитывать наличие корреляций в очереди. При этом для получения адекватных моделей необходимо учесть, что случайные временные интервалы между пакетами и временные интервалы обработки пакетов имеют распределения с «тяжелыми хвостами».

Учесть корреляцию можно, например, с использованием теории копул. Такой подход представлен в работах [12, 18, 19]. Кроме теории копул для учета корреляции можно использовать подход, основанный на применении кумулянтного анализа [12, 23].

Предположим, что временные интервалы обработки пакетов в контроллере и коммутаторе коррелированы с коэффициентом корреляции R , а их плотности вероятностей записываются в виде (5) и (6). Теперь, чтобы учесть данную корреляцию, необходимо обратиться к формуле (2) и найти плотность

вероятностей суммы коррелированных случайных величин $W = W_{(S)} + W_{(C)}$ с известными (гипергеометрическими) распределениями (индекс i опущен для упрощения записи).

Для решения данной задачи воспользуемся известным соотношением [23] для двумерной характеристической функции $G_{SC}(u, v)$ коррелированных случайных величин $W_{(S)}$ и $W_{(C)}$

$$G_{SC}(u, v) = e^{-\theta_{11}uv} G_S(u) G_C(v) \quad (15)$$

где $G_S(u)$ и $G_C(v)$ – одномерные характеристические функции случайных величин $W_{(S)}$ и $W_{(C)}$, корреляцию которых определяет совместный кумулянт θ_{11} , а коэффициент корреляции записывается как $R = \frac{\theta_{11}}{\sigma_S^2 \sigma_C^2}$ (σ_S^2, σ_C^2 – дисперсии соответствующих распределений).

Характеристические функции распределений (5) и (6) имеют вид

$$G_S(u) = p \frac{\delta_1}{\delta_1 - iu} + (1-p) \frac{\delta_2}{\delta_2 - iu},$$

$$G_C(v) = g \frac{\delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1} - iv} + (1-g) \frac{\delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2} - iv},$$

где $i^2 = -1$.

Одномерная характеристическая функция $G(v)$ может быть получена из двумерной с использованием преобразования [22]

$$G(v) = G_{SC}(v, v) = e^{-\theta_{11}v^2} G_S(v) G_C(v), \quad (16)$$

а искомая плотность вероятностей, соответствующая функции $G(v)$, определится из известного соотношения

$$f_{SC}(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(v) e^{ivy} dv. \quad (17)$$

Подставляя в (16) выражения для $G_S(u)$ и $G_C(v)$, легко получить

$$G(v) = e^{-\theta_{11}v^2} \left[\begin{aligned} &pg \frac{\delta_1 \delta_{(C)1}}{(\delta_1 - iv)(\delta_{(C)1} - iv)} + p(1-g) \frac{\delta_1 \delta_{(C)2}}{(\delta_1 - iv)(\delta_{(C)2} - iv)} + \\ &+(1-p)g \frac{\delta_2 \delta_{(C)1}}{(\delta_2 - iv)(\delta_{(C)1} - iv)} + (1-p)(1-g) \frac{\delta_2 \delta_{(C)2}}{(\delta_2 - iv)(\delta_{(C)2} - iv)} \end{aligned} \right].$$

Если полюса $z_k, k = 1, 2, \dots$ функции $G(v)$ удовлетворяют условию $\text{Im } z_k < 0$, а функция $G(z) = G(v)$ удовлетворяет лемме Жордана [24], то при $y < 0$ интеграл в (17) может быть рассчитан по формуле

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x) e^{iyx} dx = -2i\pi \sum_{k=1}^n \text{rez} \left[G(z) e^{-iyz} \right], \quad \text{Im } z_k < 0, y < 0 \quad (18)$$

через вычисление вычетов функции $G(z) e^{-iyz}$ во всех её особых точках при условии $\text{Im } z_k < 0$.

После вычисления вычетов выражение для плотности вероятностей $f_{SC}(y)$ можно записать в виде

$$f_{SC}(y) = k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2} e^{-\delta_1 y} + k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2} e^{-\delta_2 y} + k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(C)1}^2} e^{-\delta_{(C)1} y} + k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(C)2}^2} e^{-\delta_{(C)2} y}, \quad (19)$$

где

$$k_1 = \frac{pg \delta_1 \delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1} - \delta_1} + \frac{p(1-g) \delta_1 \delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2} - \delta_1}, \quad k_2 = \frac{(1-p)g \delta_2 \delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1} - \delta_2} + \frac{(1-p)(1-g) \delta_2 \delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2} - \delta_2},$$

$$k_3 = \frac{pg \delta_1 \delta_{(C)1}}{\delta_1 - \delta_{(C)1}} + \frac{(1-p)g \delta_2 \delta_{(C)1}}{\delta_2 - \delta_{(C)1}}, \quad k_4 = \frac{p(1-g) \delta_1 \delta_{(C)2}}{\delta_1 - \delta_{(C)2}} + \frac{(1-p)(1-g) \delta_2 \delta_{(C)2}}{\delta_2 - \delta_{(C)2}}.$$

Теперь в случае коррелированной очереди в формуле (3) слагаемое, содержащее свёртку $q_i \left[f_{(S)i}(u) \odot f_{(C)}(u) \right]$, должно быть заменено выражением нормированной плотности (19), и плотность вероятностей $w_{(S,C)i}(u)$ примет вид

$$w_{(S,C)i}(u) = (1-q) \left(p \delta_1 e^{-\delta_1 u} + (1-p) \delta_2 e^{-\delta_2 u} \right) + \frac{q}{K} \left[\begin{aligned} &k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2} e^{-\delta_1 u} + k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2} e^{-\delta_2 u} + \\ &+ k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(C)1}^2} e^{-\delta_{(C)1} u} + k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(C)2}^2} e^{-\delta_{(C)2} u} \end{aligned} \right], \quad (20)$$

где $K = \int_{-\infty}^{\infty} f_{SC}(y) dy$ – нормировочная константа.

Следует отметить, что одномерная плотность гиперэкспоненциально распределённых коррелированных случайных величин с коэффициентом корреляции $R = \frac{\theta_{11}}{\sigma_S \sigma_C}$ также имеет

гиперэкспоненциальную структуру.

При различных значениях R график плотности вероятности $w_{(S,C)}(u)$ будет иметь вид, показанный на рисунке 2. График получен с учетом сохранения ранее выбранных значений параметров распределений при $R = 0,5$ $R = 0,7$ $R = 0,9$ и при отсутствии корреляций.

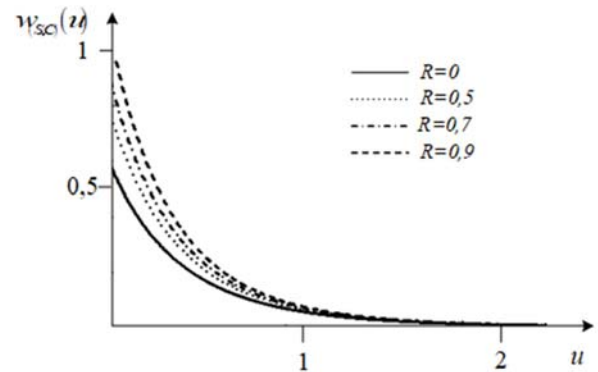


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей $w_{(S,C)i}(u)$ при отсутствии и наличии корреляции в очереди

Для коррелированного потока выражение для определения средней задержки пакета $\overline{W}_{(S,C)}$ будет иметь вид

$$\overline{W}_{(s,c)} = (1-q) \left[\frac{p}{\delta_1} + \frac{(1-p)}{\delta_2} \right] + q \left[\frac{k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2}}{(\delta_1)^2} + \frac{k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2}}{(\delta_2)^2} + \frac{k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(c1)}^2}}{(\delta_{(c1)})^2} + \frac{k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(c2)}^2}}{(\delta_{(c2)})^2} \right]. \quad (21)$$

Тогда вариацию задержки с учетом корреляции можно определить в виде выражения

$$\sigma_{(s,c)} = \sqrt{\left\{ (1-q) \left[\frac{2p}{\delta_1^2} + \frac{2(1-p)}{\delta_2^2} \right] + q \left[\frac{2k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2}}{(\delta_1)^3} + \frac{2k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2}}{(\delta_2)^3} + \frac{2k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(c1)}^2}}{(\delta_{(c1)})^3} + \frac{2k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(c2)}^2}}{(\delta_{(c2)})^3} \right] - \left\{ (1-q) \left[\frac{p}{\delta_1} + \frac{(1-p)}{\delta_2} \right] + q \left[\frac{k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2}}{\delta_1} + \frac{k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2}}{\delta_2} + \frac{k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(c1)}^2}}{\delta_{(c1)}} + \frac{k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(c2)}^2}}{\delta_{(c2)}} \right] \right\}^2 \right.}$$

Зависимость средней задержки пакета от коэффициента корреляции R будет иметь вид, показанный на рисунке 3.

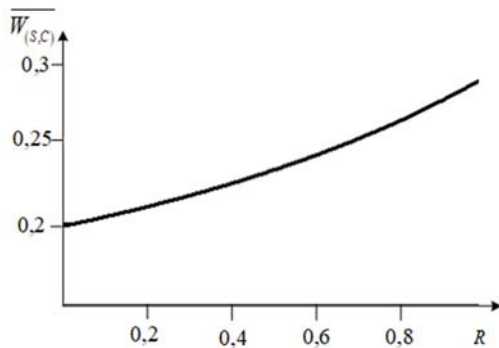


Рис. 3. Зависимость средней задержки пакета в SDN на основе OpenFlow согласно (21) при наличии корреляции в очереди

Анализ вариации задержки целесообразно производить численно, используя при расчетах последние две формулы при известных (или заданных) параметрах гиперэкспоненциальных распределений и коэффициенте корреляции.

Сравним вариацию задержки при наличии и отсутствии корреляции. Возьмём следующий набор параметров: $q_i = 0,2$, $p = 0,7$, $g = 0,75$, $\delta_{1i} = 1,9$, $\delta_{2i} = 2,7$, $\delta_{(c1)} = 5$, $\delta_{(c)} = 2,3$. Численные расчёты по формулам (10) и (21) при $R = 0,7$ дают результат: $\sigma_{(s,c)} = 0,47$, $\sigma_{корр.}^2 = 0,34$ (условных единиц времени).

Полученные значения позволяют сделать вывод, что при обработке коррелированных последовательностей вариация задержки ниже по сравнению со случаем, когда последовательности не коррелированы.

Выводы

В работе представлена аналитическая модель функционирования узла SDN с учётом возможной корреляции интервалов времени между пакетами в коммутаторе и контроллере узла SDN. Учёт корреляционных свойств произведён на основе развития модели, предложенной в [12], и основанной на использовании кумулянтного представления двумерной совместной плотности вероятностей случайных интервалов времени. Очевидно, что данный подход для моделирования совместной плотности вероятностей может быть использован для задания зависимости более «глубокой», чем корреляция,

при использовании в кумулянтном представлении характеристической функции других (кроме θ_{11}) совместных кумулянтов, например, θ_{12} и θ_{13} .

Представленный анализ показал, что появление корреляции между потоками интервалов времени входного трафика, поступающих на коммутатор и контроллер, увеличивает среднее время пребывания пакета в узле сети SDN, причем с увеличением значения коэффициента корреляции средняя задержка увеличивается почти линейно. При этом вариация задержки с появлением корреляции ожидаемо уменьшается, что физически легко объяснить, и было отмечено ранее [12] с применением копула-функций для сетей без разделения процессов маршрутизации и передачи пакетов.

В качестве дальнейших исследований необходима разработка аналитической модели функционирования SDN на основе протокола OpenFlow, учитывающая наличие корреляционных связей внутри временных последовательностей интервалов времени между пакетами и времен обработки пакетов. Решение проблемы учета корреляций внутри потоков позволит повысить точность аналитической модели, а следовательно, позволит получить более точные прогнозы параметров, определяющих качественные показатели функционирования SDN.

Литература

1. ITU-T Recommendations Y.3001 «Next Generation Networks – Future networks». ITU-T, Geneva, May, 2011.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24.11.2023 № 3339-р «Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года». <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015?index=2>
3. Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44-46.
4. Росляков А. «Сеть-2030»: взгляд МСЭ-Т на будущее сетей фиксированной связи // Первая миля. 2021. Т. 4. № 96. С. 50-59.
5. 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. Vol. 102, pp. 174-183.
6. Kartashevskiy V., Buranova M.A. OpenFlow-based software-defined networking queue model // DCCN 2021. Distributed computer and communication networks: control, computation, communications, 2021, pp. 275-280.
7. Muthana A., Buranova M. Performance evaluation of software defined networking based on openflow protocol // 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2021, pp. 143-148.
8. Самуйлов К.Е., Шалимов И.А., Бужин И.Г., Миронов Ю.Б. Модель функционирования телекоммуникационного оборудования программно-конфигурируемых сетей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 1. С. 13-26.
9. Muhizi S., Shamshin G., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372, pp. 26-37.
10. Okamura H., Dohi T., Trivedi K.S. Markovian arrival process parameter estimation with group data // Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009. Vol. 17. Iss. 4, pp. 1326-1339.
11. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic // Lecture Notes in Computer Science, 2019. Vol. 11660, pp. 610-620.

12. *Карташевский И.В.* Обработка коррелированного трафика в сетях инфокоммуникаций. М.: Горячая Линия-Телеком, 2023. 199 с.
13. *Буранова М.А., Карташевский В.Г.* Рекурсивный подбор параметров гиперэкспоненциальных распределений при аппроксимации распределений с "тяжелыми хвостами" // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 40-46.
14. *Kartashevskii V.G., Buranova M.A.* Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network // 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 - Conference Proceedings. 2018, pp. 797-802.
15. *Карташевский В.Г., Буранова М.А.* Моделирование джиттера пакетов при передаче по мультисервисной сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 17. № 1. С. 34-40.
16. *Hwang G.U., Sohraby K.* Performance of correlated queues: the impact of correlated service and inter-arrival times // Performance Evaluation. 2004. No. 55, pp. 129-145.
17. *Cidon I., Guerin R., Khamisy A., Sidi M.* Analysis of a correlated queue in a communication system // IEEE Transactions on Information Theory. 1993. Vol. 39. Iss. 2, pp. 456-465.
18. *Карташевский И.В., Волков А.Н., Киричек Р.В.* Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика // Электросвязь. 2019. № 3. С. 41-50.
19. *Буранова М.А., Резяпкина М.И.* Анализ коррелированной очереди в системе G/G/1 // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 4. С. 417-427.
20. *Taggu M.S.* Self-similar processes. In S. Kotz and N. Johnson, editors, Encyclopedia of Statistical Sciences. Wiley, New York. 1988. Vol. 8, pp. 352-357.
21. *Буранова М.А.* Исследование статистических характеристик самоподобного телекоммуникационного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т.10. №4. С. 35-41.
22. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
23. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское радио, 1978. 376 с.
24. *Свешников А.Г., Тихонов А.Н.* Теория функции комплексной переменной: учебн.: для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 336 с.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TRAFFIC CORRELATION ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN SDN NODE USING THE OPEN FLOW PROTOCOL

Marina A. Buranova, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, m.buranova@psuti.ru

Vyacheslav G. Kartashevskiy, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, v.kartashevskiy@psuti.ru

Abstract

The constantly increasing volumes of transmitted traffic have led to the emergence of new infocommunication technologies that are designed to improve the quality indicators (QoS) of network nodes. One of these technologies is the technology of using software-defined networks (SDN), which involves the separation of the routing plane and switching of traffic flows. In this case, the analysis of the operation of any network node should be carried out taking into account the design features of the specified separation and taking into account the correlation properties of traffic (in particular, the correlation of time intervals between packets arriving for processing), the appearance of which is due to the combination of many variable ON/OFF sources, and the mechanisms for controlling such sources, the emergence of new services and applications and other reasons related to the characteristics of the protocols used. The paper provides an analysis of the influence of the correlation of time intervals between incoming packets on the operation of a node in a software-defined network operating using the Open Flow protocol. Analytical expressions are obtained for calculating the average values of the packet delay time at a network node and the variation of this delay. In this case, the analytical model of a network node is described by the G/G/1 system, in which the probability densities of time intervals between incoming packets and packet processing time intervals are specified by hyperexponential models, and the model for the density of time intervals between packets takes into account the correlations of adjacent intervals. A comparison is given of the average delay time in a node and the delay variation in the presence and absence of correlation.

Keywords: queue model, software defined networks, quality of service (QoS), hyperexponential distribution, average time for servicing a request in the system, correlation of time intervals

References

1. ITU-T Recommendations Y.3001 "Next Generation Networks - Future networks". ITU-T, Geneva, May, 2011.
2. Order of the Government of the Russian Federation dated November 24, 2023 No. 3339-r "Strategy for the development of the communications industry of the Russian Federation for the period until 2035". <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015?index=2>.
3. A.E. Kucheryavyi, M.A. Makolkina, R.V. Kirichek, "Tactile Internet. Communication networks with ultra-low delays," *Telecommunications*. 2016. No. 1, pp. 44-46. (In Russian)
4. A. Roslyakov, "Network-2030": ITU-T's view of the future of fixed-line networks," *First Mile*. 2021. Vol. 4. No. 96, pp. 50-59. (In Russian)
5. B.K. Xiong, J. Yang, Li W. Zhao, K. Li, "Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model. *Computer Networks*," 2016. Vol. 102, pp. 174-183.
6. M.A. Buranova, V. Kartashevskiy, "OpenFlow-based software-defined networking queue model DCCN 2021," *Distributed computer and communication networks: control, computation, communications*, 2021, pp. 275-280.
7. M. Buranova, A. Muthana, "Performance evaluation of software defined networking based on openflow protocol," *2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2021, pp. 143-148.
8. K.E. Samujlov, I.A. Shalimov, I.G. Buzhin, Yu.B. Mironov, "Model funkcionirovaniya telekommunikacionnogo oborudovaniya programmno-konfiguriruemyh setej," *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*, 2018, vol. 14, no 1, pp. 13-26. (In Russian)
9. S. Muhizi, G. Shamshin, A. Muthanna, R. Kirichek, A. Vladyko, A. Koucheryav, "Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model," *Lecture Notes in Computer Science*, 2017. Vol. 10372, pp. 26-37.
10. H. Okamura, T. Dohi, K.S. Trivedi, "Markovian arrival process parameter estimation with group data," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009. Vol. 17, iss. 4, pp. 1326-1339.
11. I. Kartashevskiy, M. Buranova, "Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic," *Lecture Notes in Computer Science*, 2019. Vol. 11660, pp. 610-620.
12. I.V. Kartashevskiy, "Processing of correlated traffic in infocommunication networks," Moscow: Hot Line – Telecom, 2023. 199 p. (In Russian)
13. H. Dbira, A. Girard, B. Sanso, "Calculation of packet jitter for non-poisson traffic," *Annals of telecommunications*. 2016. Vol. 71. Iss. 5-6, pp. 223-237.
14. V.G. Kartashevskii, M.A. Buranova, "Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network. 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology," PIC S and T 2018 - Conference Proceedings. 2018, pp. 797-802.
15. M.A. Buranova, V.G. Kartashevskii, R.T. Latypov, "Estimation of jitter in the G/M/I system based on the use of hyperexponential distributions," *Infokommunikacionnie tekhnologii*, no. 18(1), 2020, pp. 13-20. (In Russian)
16. G.U. Hwang, K. Sohraby, "Performance of correlated queues: the impact of correlated service and inter-arrival times," *Performance Evaluation*. 2004. No. 55, pp. 129-145.
17. I. Cidon, M Sidi, "Analysis of a correlated queue in a communication system," *IEEE Transactions on Information Theory*. 1993. Vol. 39. Iss. 2, pp. 456-465.
18. I.V. Kartashevskiy, A.N. Volkov, R.V. Kirichek, "Analysis of the average latency in a queuing system when processing correlated traffic," *Telecommunications*. 2019. No. 3, pp. 41-50. (In Russian)
19. M.A. Buranova, M.I. Rezyapkina, "Analysis of a correlated queue in the G/G/I system," *Infocommunication technologies*. 2020. Vol. 18. No. 4, pp. 417-427. (In Russian)
20. M.S Taggu, "Self-similar processes," In S. Kotz and N. Johnson, editors, *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Wiley, New York. 1988. Vol. 8, pp. 352-357.
21. O.I. Sheluhin, A.M. Tenyakshev, A.V. Osin, "Fractal Processes in Telecommunications," Moscow: Radiotekhnika Publ., 2003, 480 p. (In Russian)
22. B.R. Levin, "Theoretical foundations of statistical radio engineering," 3rd ed. Moscow: Radio and Communications, 1989. 656 p.
23. A.N. Malakhov, "Cumulant analysis of random non-Gaussian processes and their transformations," Moscow: Soviet radio, 1978. 376 p. (In Russian)
24. A.G. Sveshnikov, A.N. Tikhonov, "The theory of functions of a complex variable: textbook: for universities," 6th ed. Moscow: FIZMATLIT, 2005. 336 p. (In Russian)

Information about authors:

Marina A. Buranova, Professor of Information Security Department, Doctor of Technical Sciences, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

Vyacheslav G. Kartashevskiy, Professor of Information Security Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-27-33

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

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

Manuscript received 30 January 2024;
Accepted 05 March 2024

Ключевые слова: управленческие решения,
мониторинговый и ситуационный центры, модель
решения, человеко-машинная система, навыки
управления

Современное состояние человеко-машинных систем (ЧМС) управления зависит не только от современного аппаратно-программного обеспечения, но и от способности человека своевременно принимать решения в сложившейся обстановке. Вопросы развития управленческих навыков всегда рассматривались как важные и необходимые. В современных условиях развития информационных систем необходимо постоянно совершенствовать свои навыки и умения для реализации своевременных управленческих решений. Навыки и умения, полученные в образовательной организации, будут определяющими в построении логики дальнейших действий по принятию решения, как ответная реакция на возникшую проблему в системе управления организации. Наличие современной технической базы в комплексе с практической отработкой навыков принятия решений становится необходимым условием в развитии навыков управленческих решений. При рассмотрении действующей системы управления, можно её рассматривать как штатную. Возникающие в процессе деятельности негативные воздействия на систему управления направлены на разрушение штатной деятельности, что является недопустимым для организации. Вопросы противодействия негативным воздействиям отрабатываются на полигонной базе учебного заведения с целью развития навыков и умений у человека противодействия возникающим проблемам и способности возвращать систему в штатный режим. Комплексное взаимодействие ситуационного и мониторингового центров при отработке практических занятий позволяет команде участников достигать необходимого результата в развитии навыков управленческих решений. Развитие навыков позволяет автоматизировать процессы управления и повышать показатель эффективности реализации решения при штатном функционировании системы.

Информация об авторах:

Грачев Михаил Иванович, научный сотрудник, Санкт-Петербургский университет МВД России, г. Санкт-Петербург, Россия
Бурлов Вячеслав Георгиевич, профессор высшей школы техносферной безопасности, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Грачев М.И., Бурлов В.Г. Человеческий фактор в принятии управленческих решений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 27-33.

For citation:

Grachev M.I., Burlov V.G. (2024). Human factor in adoption management decisions. T-Comm, vol. 18, no.3, pp. 27-33. (in Russian)

Введение

Развитие и внедрение в жизнь человека информационных технологий в современном мире, требует от предприятий и организаций постоянного соответствия им и как следствие поддержание техники, отвечающей современному уровню технического развития, так и соответствующее проведение подготовки и/или переподготовки персонала. Таким образом, образуется совокупная система взаимодействующих элементов в виде ЧМС, решающая возникающие трудности в системе управления организации [1].

Своевременное принятие решений персоналом на возникающие проблемы в работе организации для их скорейшего преодоления является актуальной задачей для руководителя организации. Решение данной задачи может быть осуществлено через показатель эффективности реализации решения и как следствие её автоматизации [2].

Постановка задачи

Вопросы управления организацией и её автоматизация являются актуальной задачей проводимого исследования. Процессы управления могут быть улучшены как со стороны технического оснащения, так и со стороны кадрового состава. Соответственно, вопрос рассмотрения подготовки и квалификации может быть рассмотрен от лица, принимающего решение (ЛПР).

Принятие управленческих решений от ЛПР напрямую будет зависеть от его навыков и умений, которые сформировались в процессе жизнедеятельности (полученного опыта), как и у персонала организации. В настоящее время постоянное обучение входит в норму, так как увеличиваются потоки информации, требующие изучения.

Из анализа публикуемой литературы можно выделить следующих авторов, которые рассматривали вопрос влияния человеческого фактора на принятие управленческого решения: И.П. Скворцов, А.О. Титарев [3], И.В. Калуцкий, А.А. Агафонов [4], Д.Г. Маркова [5], А.В. Енгибарян, Ф.В. Шутилов [6]; В.А. Гончаренко, А.Н. Богатова, В.Е. Хабаров [7]; Ю.А. Зуева [8]; А.А. Гребенщикова [9]; Е.С. Дашкова [10]; Е.А. Демидова [11]; А.О. Алексеев [12].

Авторы пытаются в публикуемой литературе указать на повышение эффективности работы рассматриваемой системы [13] за счет решения различных задач, например в диссертационном исследовании, А.В. Козловой происходит повышение эффективности производственного контроля изделий на основе метода идентификации пригодности измерительного оборудования [14].

Рассматривая работы академиков РАН П.К. Анохина [15] и Д.А. Новикова [16] необходимо определить, что в их работах деятельность человека основывается на модельном поведении человека. Деятельность человека основывается на удовлетворении его потребностей [15]. Реализация которых основывается на решении задач по достижении цели этой деятельности. Решение задачи происходит на основе созданной сознанием модели наиболее правильного решения [16].

В связи с этими выводами учёные писали, что человек мыслит и ведёт свою деятельность на основе модели. Руководитель в своей повседневной деятельности как ЛПР осуществляет руководство организацией на основе моделей [15].

Модели действия как ответная реакция приобретаются и вырабатываются на протяжении всей жизни. Модель решения задачи управления может быть применена как ответная реакция на возникновение проблем в системе управления организацией. При решении возникших проблем в ЧМС знания, навыки и умения персонала позволяют быстро им противодействовать.

Вопрос получения дополнительных знаний в настоящее время очень важен для достижения поставленных целей деятельности организации, так как меняющаяся информационная система, требует постоянного получения знаний от человека. В связи с этим в работе требуется решить вопрос о влиянии человеческого фактора на принятие управленческих решений ЛПР.

Подход к построению системы

Руководитель при решении задач управления основывается на модельном управлении организационной системой. Для формирования математической модели управленческого решения приходится использовать всю совокупность полученных знаний, а также задействовать существующие резервы кадровые и технические.

ЧМС представленная организацией находится во взаимозависимости от технического оснащения и подготовленности персонала. Для разработки математической модели управленческого решения руководителя существует два подхода, основанные на анализе и синтезе. Подход, основанный на анализе перед подходом, основанным на синтезе, имеет один существенный недостаток, он не гарантирует достижение цели деятельности. Подход, основанный на синтезе лишен данного недостатка.

Научный метод, применяющийся для синтеза модели управленческого решения называется моделированием. Основной проблемой при моделировании систем выступает проверка на адекватность (соответствие) получаемой математической модели.

При проведении оценки адекватности модели выделяются три способа: проведение эксперимента, сравнение с эталоном и учёт закономерностей предметной области. Последний подход является наиболее приемлемым и применяется в научной школе, включенной в реестр ведущих школ Санкт-Петербурга [17].

Для создания модели мы применяем системное моделирование, а также методы декомпозиции и агрегирования. То есть, рассматриваемая система подлежит разделению на составляющие, замене полученных элементов требуемыми с сохранением логических связей и соединению полученных элементов в единое целое.

Именно квалифицированный специалист, подготовленный высшим учебным заведением способен к моделированию процесса в конкретной области. Знания, умения и навыки специалиста, полученные в образовательной организации, позволяют ему как управленцу адекватно реагировать на поставленные задачи, а также своевременно реагировать на возникновение в системе проблем для их преодоления. Напрашивается вывод о необходимости системного подхода в подготовке кадров [18].

В работе профессора Воронова М.В. предлагается системный подход, моделирующий деятельность вуза со стороны

создания программных комплексов позволяющих моделировать вузовскую деятельность с позиции системного подхода, что является логичным в настоящее время [18].

Моделирование системы решения задачи управления

В публикуемой литературе подход, основанный на синтезе, практически не рассматривается, но применяется в работе научной школы под руководством Бурлова В.Г. [17]. Так как ЧМС является сложной системой, то получение математической модели необходимо решать через её моделирование. Моделирование сложных систем имеет важную особенность, выражающуюся в зависимости от многочисленных факторов. Каждый, из которых должен быть учтён, что делает исследование вопроса затруднительным. Для преодоления возникшего затруднения, вводятся ограничения и дополнения в исследуемую задачу по управлению руководителем предприятия или организации.

ЛПР как руководитель предприятия управляет им в повседневной штатной деятельности, согласно отлаженному механизму. Управление представляет собой регулирование совокупностью взаимодействующих подразделений.

Штатное функционирование системы можно представить в виде графа состояний системы (рис. 1).

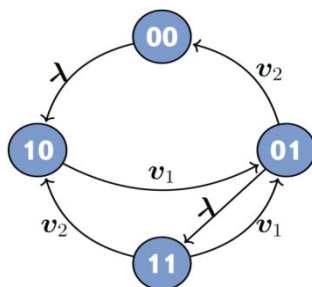


Рис. 1. Граф состояний штатного функционирования системы управления

На рисунке 1 представлены следующие состояния системы и обозначения:

00 – штатное состояние системы управления или штатное функционирование предприятия;

01 – состояние системы управления предприятия, при котором происходит определение воздействия на систему, но противодействия не оказывается;

10 – состояние системы управления, при котором определение воздействия не происходит, но система пытается справиться с возникшими трудностями в системе управления;

11 – состояние системы управления, при котором происходит и определение воздействия и происходит противодействие.

λ – частота потока проблем, воздействующий на систему;

v_1 – частота определения возникающих в системе потока проблем;

v_2 – частота нейтрализации потока проблем в системе управления предприятием;

Выражая состояние системы через вероятности $P_{00}=00$, $P_{01}=01$, $P_{10}=10$, $P_{11}=11$ и решая данную систему графов через дифференциальные уравнения Колмогорова (1):

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \tag{1}$$

Дифференциальные уравнения Колмогорова, могут быть преобразованы в алгебраические для упрощения решения задачи [19].

В нашем случае получится следующее решение (2):

$$\frac{d}{dt} P_{00}(t) = -P_{00}(t) \lambda + P_{01}(t) v_2,$$

$$\frac{d}{dt} P_{01}(t) = -P_{01}(t) (\lambda + v_2) + P_{11}(t) v_1 + P_{10}(t) v_1,$$

$$\frac{d}{dt} P_{10}(t) = P_{00}(t) \lambda - P_{10}(t) v_1 + P_{11}(t) v_2,$$

$$\frac{d}{dt} P_{11}(t) = P_{01}(t) \lambda - P_{11}(t) (v_1 + v_2).$$

Нам важно именно следующее полученное состояние, отражающее сущность решения задачи управления, что возникающие в системе управления затруднения разрешаются с заданным уровнем показателя эффективности реализации решения с ограничением на деятельные ресурсы и ресурсы обстановки (3):

$$P_{00} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2} \tag{3}$$

При стремлении данной вероятности P_{00} к единице, система управления будет функционировать в рамках штатного режима, так как возникающие проблемы в организации будут разрешаться с требуемым показателем эффективности реализации решения [20]. Например: 0,8; 0,9 или 0,95.

При проведении расчетов, можно определить данный показатель работы организации при её штатном функционировании на основе задействования человеческого потенциала и технической составляющей. Если полученный показатель эффективности реализации решения ЛПР $P_{00}=P$ будет со временем уменьшаться, то система требует анализа и последующего задействования ресурсов (кадрового и/или технического) для нахождения проблемы в системе и возврату в требуемое состояние.

Так как система управления зависит от технического и кадрового состава, то и показатель эффективности реализации решения будет напрямую способствовать автоматизации процессов управления организации. Как следствие на повышение эффективности влияет обновление технической части и переподготовка кадрового состава [21].

Например, при задействовании ситуационных центров, можно осуществлять комплексную подготовку к решению задач управления. Структура ситуационных центров представлена рисунком 2.

Представленная схема позволяет судить о возможности подготовки специалистов и развитию у них знаний, умений и навыков системного мышления, так как в ситуационных центрах уже заложен системный подход, позволяющий обучаемому мыслить и принимать решения оперируя большим объемом получаемых данных.

Именно подготовка кадрового состава важна в ЧМС, так как в настоящее время человек определяет направление деятельности и порой принимает решение раньше автоматизированной машины. Данный недостаток будет уменьшаться со временем, так как в автоматизацию машины будут вкладывать всё большее количество информации и больше данных по решению задач управления. Бурное развитие в настоящее время программной среды в виде искусственного интеллекта является одним из показателей интереса к этому направлению.



Рис. 2. Структура ситуационных центров

Одним из выше указанных важных факторов является подготовка и переподготовка кадрового состава организации или по-другому получение навыков необходимых для преодоления проблем, с которыми сталкиваешься в деятельности управления и принятия решений.

Применение ситуационных и мониторинговых центров позволяет работать в команде, развивать навык управления в режиме онлайн проведения мероприятий, то есть применяя имеющиеся технические ресурсы (телефон, факс, видеоконференцсвязь и т.д.) [21].

Взаимодействие между двумя ситуационными центрами, через средства коммуникации, с возможностью всё визуально отображать и разбирать на больших экранах позволяет учитывать мелкие недочеты в процессе управления и в последствии преодолеть их, доводя до нужного показателя эффективности реализации решения.

Определение потока проблем и дальнейшее её разрешение в системе предприятия или на одном из его технологических процессов напрямую зависит от подготовки персонала.

Комплексный подход на базе ситуационных центров позволяет производить подготовку (переподготовку) персонала в различных ситуациях, что позволяет производить сбор информации, моделировать ситуации, визуально представлять проблему и принимать управленческие решения (рис. 3).

Полученные умения и навыки при работе в ситуационных центрах позволяют производить слаженное взаимодействие персонала, отрабатывая чрезвычайные ситуации, а также выработать требования к используемому аппаратно-программному комплексу, тем самым моделировать процессы управления, доводя их до автоматизации. Так как человек мыслит на основе моделей, правильная выработка решений по проблемной ситуации становится особенно важна.

Результатом подготовки персонала является способность своевременно принимать решения и строить правильно построенную систему как ответную реакцию на возникающие затруднения в системе управления.

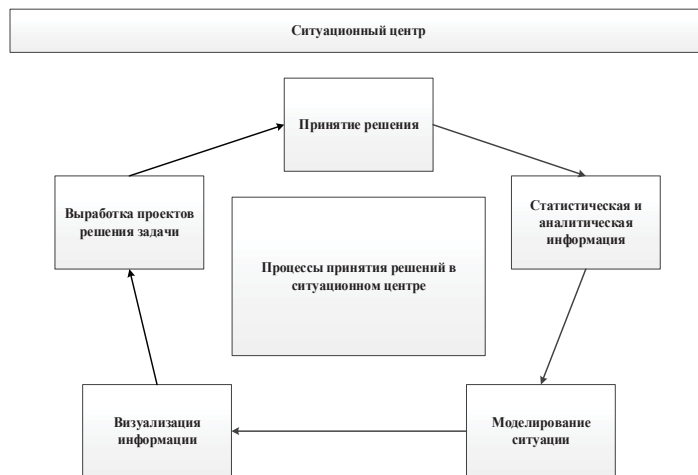


Рис. 3. Процессы принятия решений в ситуационном центре

Модель решения можем представить через декомпозицию, абстрагирование и агрегирование управленческого решения (рис. 4).

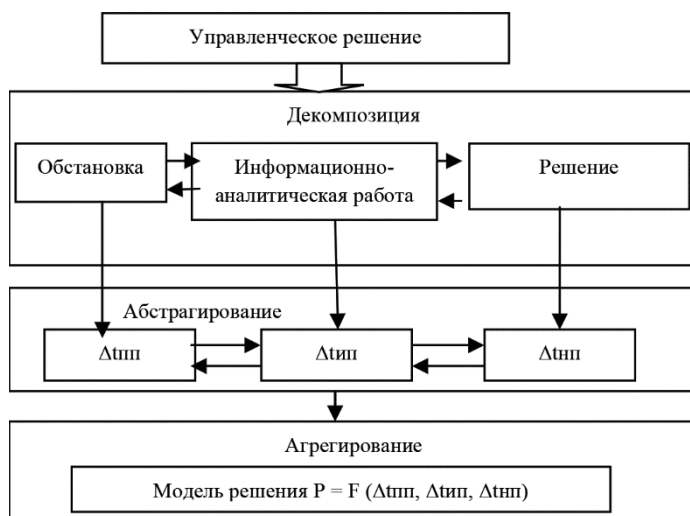


Рис. 4. Модель управленческого решения

Из полученной формулы (4) видим зависимость P показателя эффективности управленческого решения:

$$P = F (\Delta t_{пп}, \Delta t_{ип}, \Delta t_{нп}), \quad (4)$$

где $\Delta t_{пп}$ – среднее время проявления проблемы в системе управления предприятия;

$\Delta t_{ип}$ – среднее время идентификации проблемы в системе;

$\Delta t_{нп}$ – среднее время нейтрализации проблемы в системе [22].

Последние два показателя напрямую зависят от аппаратно-программного комплекса, которыми обеспечено предприятие и человеческого фактора (способностей человека, отвечающего за данное направление по своим навыкам и умениям своевременно распознавать возникающую проблему в системе) (5):

$$P = F(\Delta t_{\text{ин}}, \Delta t^{\text{чФ}}_{\text{ин}} + \Delta t^{\text{ТО}}_{\text{ин}}, \Delta t^{\text{чФ}}_{\text{ин}} + \Delta t^{\text{ТО}}_{\text{ин}}), \quad (5)$$

где ЧФ – человеческий фактор; ТО – техническое оснащение.

Как итог, можно выявить закономерность, чем раньше в системе управления предприятия происходит идентификация, и нейтрализация негативного воздействия тем эффективней работает рассматриваемая система.

В связи с данным обстоятельством графически можно представить следующее состояние исследуемой системы (рис. 5). Персонал организации своевременно противодействует возникающим в системе проблемам на основе полученной квалификации. Чем квалификация выше, тем быстрее происходит реакция на угрозу и тем меньше затрачивается времени на реализацию решения.

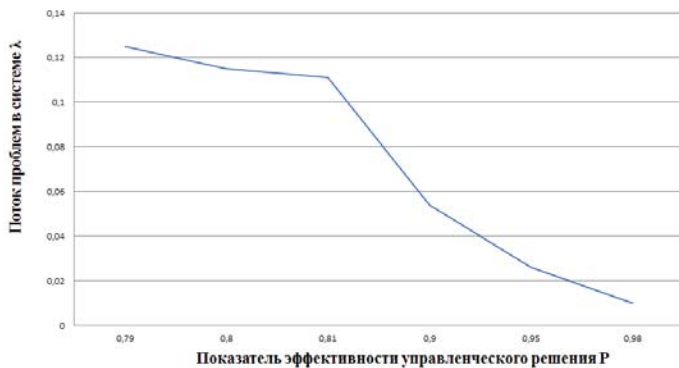


Рис. 5. Зависимость показателя эффективности от потока проблем в системе

На данном рисунке просматривается зависимость показателя эффективности управленческого решения от интенсивности возникновения проблем в системе. Показатель эффективности реализации решения будет выше, если будет выше соответствующая подготовка кадрового состава и как следствие ниже интенсивность возникновения проблем в системе. Подготовка в рамках применения ситуационных центров позволяет подойти комплексно к решению задачи управления организацией, а также указать на важность человеческого фактора в принятии управленческих решений.

Проведенная работа подчеркивает необходимость подготовки кадрового состава организации. Целесообразно на базе крупных организаций создавать свои ситуационные центры решения задач управления и принятия решений, что позволит сократить расходы на платежи в сторонние организации и позволит на своей базе отрабатывать различные проблемные ситуации для выработки модели решения, что повысит эффективность реализации решения.

Эффективность реализации решения будет повышаться от своевременности принятия решений персоналом, так как будет сокращаться время на принятие решения противодействию возникающим проблемам. Соответственно ЛПР важно иметь модель решения, позволяющую своевременно противодействовать возникающим проблемам.

Определить время возникновения проблемы в системе управления организации является сложным процессом, так как эта величина является случайной. Для этого необходимо применять марковские процессы, так как это позволяет решать многие практические задачи, а также описать сложные системы, которой и является организация [23].

Соответственно временные состояния системы являются случайными величинами с дискретным состоянием и непрерывным временем, согласно рисунка 1.

Как итог у нас получено соотношение (4), связывающее три параметра системы. Именно это полученное выражение переходит в соотношение (5), в котором два параметра системы делятся еще на два человеческий фактор и техническое оснащение. Таким образом, получена аналитическая зависимость связи информационно-аналитической деятельности системы, обобщенных характеристик системы и нейтрализации проблемы.

Рассматривая соотношение (3) как условие существования процесса управления организацией и задавая требуемый показатель эффективности реализации решения в виде показателя P . Мы можем представить в виде функций следующие параметры рассматриваемой системы:

- характеристикой обстановки среднего времени проявления проблемы в рассматриваемой системе $\Delta t_{\text{ин}} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$;
- характеристикой обстановки среднего времени идентификации проблемы в рассматриваемой системе $\Delta t_{\text{ин}} = f_1(y_1, y_2, \dots, y_n)$;
- характеристикой обстановки среднего времени нейтрализации проблемы в рассматриваемой системе $\Delta t_{\text{ин}} = f_1(z_1, z_2, \dots, z_n)$.

Вектора X, Y, Z соответствуют процессам образования проблемы, идентификации проблемы и нейтрализации проблемы.

Но в работе рассматривается зависимость показателя эффективности реализации решения от проявления проблемы в системе управления и процессом идентификации человеком в системе управления. Трехмерный график такой зависимости представлен на рисунке 6.

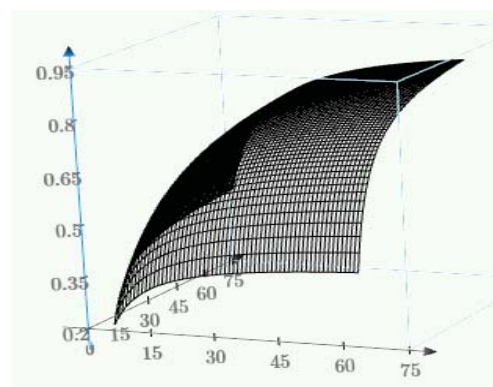


Рис. 6. Зависимость показателя эффективности реализации решения от характеристик системы

Данная зависимость показателя эффективности реализации решения может быть представленная как на рисунке, так и в виде числовой зависимости получаемых данных. По полученным параметрам управленческого решения проводится анализ действующей системы управления, и вносятся изменения в мониторинг системы управления с установленными ограничениями на деятельный ресурс и ресурс обстановки.

В дальнейшем при известных характеристиках человеческого фактора мы можем предъявить требования к техническому оснащению организации. Решая обратную задачу и зная характеристики технического оснащения, мы можем предъявлять требования к персоналу организации.

Заключение

В современном мире происходят глобальные изменения за счет постоянного внедрения информационных технологий в предприятия и их технологические процессы.

Усовершенствуются как техническое оснащение, так и программные комплексы. Для соответствия современным информационным технологиям ЛППР должно постоянно совершенствовать свои навыки и квалификацию.

Внедрение в процессы подготовки, переподготовки и повышения квалификации учебных мест в виде ситуационных центров позволяет совершенствовать навыки и мастерство кадрового состава, работать в команде и получать необходимые знания для совершенствования своей сферы деятельности.

Располагая данными по среднему времени возникновения проблемы в системе, идентификации проблемы и её нейтрализации, путем решения обратной задачи можно получить требуемые показатели эффективности управленческого решения необходимые для успешного преодоления возникающих трудностей в организации и возвращению её к штатной работе с требуемым показателем эффективности реализации решения.

Литература

1. *Грачев М.И., Грачева Н.Г., Бурлов В.Г., Чудаков О.Е.* Человеко-машинные системы // Неирокомпьютеры и их применение: Сборник тезисов XXI Всероссийской научной конференции, Москва, 28 марта 2023 г. М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2023. С. 16-17. EDN PSDJPB

2. *Грачев М.И.* Показатель автоматизации как критерий эффективности реализации управленческих решений в организации // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 3(63). С. 57-65. EDN FTRNCQ

3. *Скворцов И.П., Титарев А.О.* О проблеме человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2022. № 23. С. 106-113. EDN HUFMVI

4. *Калуцкий И.В., Агафонов А.А.* Роль человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности бизнеса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-2. С. 173-178. EDN RDGWMT

5. *Маркова Д.Г.* Человеческий фактор в информационной безопасности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 149-152. EDN YRBHLN

6. *Енгибарян А.В., Шутилов Ф.В.* Роль человеческого фактора в принятии управленческого решения // Производственный менеджмент: теория, методология, практика : сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Новосибирск / Министерство образования и науки РФ; Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. С. 125-130. EDN WLMNFB

7. *Гончаренко В.А., Бозатова А.Н., Хабаров В.Е.* Роль человеческого фактора в процессах принятия управленческих решений и их эффективности // Наука и образование: актуальные вопросы, проблемы теории и практики: Сборник научных трудов Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Краснодар, 27 ноября 2020 года. Краснодар: Краснодарский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова", 2020. С. 602-611. EDN XBBYJK

8. *Зуева Ю.А.* Роль человеческого фактора в принятии управленческих решений // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов научно-практической и учебной конференции: в 3 частях, Санкт-Петербург, 05–07 июня 2018 года. Том Часть 1. Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический

университет Петра Великого", 2018. С. 209-212. EDN XPNRVJ

9. *Гребенщикова А.А.* Влияние человеческого фактора на управление рисками и принятие управленческих решений // Структурные преобразования экономики территорий: в поиске социального и экономического равновесия : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Уфа, 24 декабря 2019 года. Том Часть 1. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2019. С. 110-113. EDN GZOZTX

10. *Дашкова Е.С.* Роль человеческого фактора в процессе разработки и реализации управленческих решений // Мотивация и оплата труда. 2016. № 4. С. 306-312. EDN XGOENT

11. *Демидова Е.А.* Трансформация модели принятия экономических решений // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10-2(112). С. 140-142. DOI 10.23670/IRJ.2021.112.10.056. EDN SJJJHV

12. *Алексеев А.О.* Концепция субъектно-ориентированного моделирования многофакторных рисков в мультиагентных системах. 2015. № 4(76). С. 19. EDN TWQEKN

13. *Бурлов В.Г., Грачев М.И., Васильев М.Н., Капицын С.Ю.* Модель управления в социальных и экономических системах с учетом воздействия на информационные процессы в обществе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 5. С. 46-55. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-5-46-55. EDN IBIABC

14. *Козлова А.В.* Разработка метода идентификации пригодности измерительного оборудования в управлении автоматизированными производственными системами : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Козлова Александра Владимировна, 2021. 174 с. EDN ZYZQXS

15. *Анохин П.К.* Идеи и факты в разработке теории функциональных систем // Психологический журнал. 1984. Т. 5. С. 107-118.

16. *Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М.* Человек и биосфера: Опыт систем, анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985. 271 с.

17. Реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга // Вузы и научные организации, в которых функционируют ведущие научные и научно-педагогические школы Санкт-Петербурга: [Электронный ресурс]. СПб. 2011-2020. URL: <http://knvsh.gov.spb.ru/media/files/contests/closed/85/Spisok%201.pdf>.

18. *Воронов М.В.* Системный подход при моделировании деятельности технического вуза // Профессорский журнал. Серия: Технические науки. 2022. № 1(5). С. 49-55. DOI 10.18572/2686-8598-2022-5-1-49-55. EDN IEPMRG

19. *Грачев М.И., Бурлов В.Г.* Математическое моделирование в социальных и экономических системах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 5. С. 38-45. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-5-38-45. EDN CRNULK

20. *Грачев М.И.* Повышение эффективности работы организации на основе критерия автоматизации // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 144-150. DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-144-150. EDN MWLFLF

21. *Беженцев А.А., Бурлов В.Г., Грачев М.И.* Внедрение новых информационных технологий в образовательный процесс на основе использования учебных полигонов мониторинговый центр и ситуационный центр // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 7. С. 36. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-7-36-41. EDN IRKOQO

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

23. *Малафеев О.А., Зайцева И.В., Шлаев Д.В.* и др. Моделирование процесса взаимодействия в информационно-вычислительной сети как системе с марковскими процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 444-451. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-6-444-451. EDN OTLDKQ

HUMAN FACTOR IN ADOPTION MANAGEMENT DECISIONS

Mikhail I. Grachev, Saint Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Saint Petersburg, Russia, mig2500@mail.ru
Vyacheslav G. Burlov, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia, burlovg@mail.ru

Abstract

The current state of human-machine control systems (HMS) depends not only on modern hardware and software, but also on the ability of a person to make timely decisions in the current situation. The issues of developing managerial skills have always been considered important and necessary. In modern conditions of information systems development, it is necessary to constantly improve their skills and abilities to implement timely management decisions. The skills and abilities acquired in an educational organization will be decisive in building the logic of further decision-making actions, as a response to a problem in the organization's management system. The availability of a modern technical base in combination with the practical development of decision-making skills becomes a necessary condition for the development of managerial decision-making skills. When considering the current management system, it can be considered as a regular one. The negative impacts that arise in the course of activity on the management system are aimed at destroying regular activities, which is unacceptable for the organization. The issues of countering negative impacts are being worked out at the training ground of the educational institution in order to develop human skills and abilities to counter emerging problems and the ability to return the system to normal operation. The complex interaction of the situational and monitoring centers during the development of practical exercises allows the team of participants to achieve the necessary result in the development of managerial decision skills. The development of skills allows you to automate management processes and increase the efficiency of the solution implementation in the normal operation of the system.

Keywords: management solutions, monitoring and situation centres, solution model, man-machine system, management skills.

References

1. M.I. Grachev, N.G. Gracheva, V.G. Burlov, O.E. Chudakov, "Human-machine systems," *Neurocomputers and their application: Collection of abstracts of the XXI All-Russian Scientific Conference*, Moscow, March 28, 2023. Moscow State Psychological and Pedagogical University, 2023, pp. 16-17.
2. M. I. Grachev, "Automation indicator as a criterion for the effectiveness of implementing managerial decisions in an organization," *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2023. Vol. 12, No. 3(63), pp. 57-65.
3. I. P. Skvortsov, A. O. Titarev, "On the problem of the human factor in ensuring information security," *Aerospace forces. Theory and practice*. 2022. No. 23, pp. 106-113.
4. I.V. Kalutsky, A.A. Agafonov, "The role of the human factor in ensuring business information security," *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, computer engineering, computer science. Medical instrumentation*. 2012. No. 2-2, pp. 173-178.
5. D.G. Markova, "The human factor in information security," *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2018. No. 10, pp. 149-152.
6. A.V. Engibaryan, F.V. Shutilov, "The role of the human factor in making managerial decisions," *Production management: theory, methodology, practice: collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference*, Novosibirsk, May 18-14, 2016 / Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016, pp. 125-130.
7. V.A. Goncharenko, A.N. Bogatova, V.E. Khabarov, "The role of the human factor in the processes of managerial decision-making and their effectiveness," *Science and education: topical issues, problems of theory and practice: Collection of scientific papers of the National (All-Russian) scientific and practical conference*, Krasnodar, November 27 2020. Krasnodar: Krasnodar branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Plekhanov Russian University of Economics", 2020, pp. 602-611.
8. Yu. A. Zueva, "The role of the human factor in managerial decision-making," *Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade: Proceedings of the scientific, practical and educational conference: in 3 parts*, St. Petersburg, 05-07 June 2018. Volume Part I. St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2018, pp. 209-212.
9. A.A. Grebenshchikova, "The influence of the human factor on risk management and managerial decision-making," *Structural transformations of the economy of territories: in search of social and economic equilibrium: A collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference*, Ufa, December 24, 2019. Part 1. Ufa: Limited Liability Company "Scientific Publishing Center "Bulletin of Science", 2019, pp. 110-113.
10. E.S. Dashkova, "The role of the human factor in the process of developing and implementing management decisions," *Motivation and remuneration*. 2016. No. 4, pp. 306-312.
11. E.A. Demidova, "Transformation of the model of economic decision-making," *International Scientific Research Journal*. 2021. No. 10-2(112), pp. 140-142. DOI 10.23670/IRJ.2021.112.10.056.
12. A.O. Alekseev, "The concept of subject-oriented modeling of multifactorial risks in multi-agent systems," 2015. No. 4(76). P. 19.
13. V.G. Burlov, M.I. Grachev, M.N. Vasiliev, S.Yu. Kapitsyn, "Management model in social and economic systems, taking into account the impact on information processes in society," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 5, pp. 46-55. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-5-46-55.
14. A.V. Kozlova, Development of a method for identifying the suitability of measuring equipment in the management of automated production systems: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and productions (by industry)": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Kozlova Alexandra Vladimirovna, 2021. 174 p.
15. P.K. Anokhin, "Ideas and facts in the development of the theory of functional systems," *Psychological Journal*. 1984. Vol. 5, pp. 107-118.
16. N.N. Moiseev, V.V. Alexandrov, A.M. Tarko, "Man and the biosphere: The experience of systems, analysis and experiments with models," Moscow: Nauka, 1985. 271 p.
17. "The register of the leading scientific and scientific-pedagogical schools of St. Petersburg," *Universities and scientific organizations in which the leading scientific and scientific-pedagogical schools of St. Petersburg operate*: [Electronic resource]. St. Petersburg. 2011-2020. URL:<http://knvsh.gov.spb.ru/media/files/contests/closed/85/Spisok%201.pdf>.
18. M.V. Voronov, "Systematic approach to modeling the activities of a technical university," *Professorial Journal. Series: Technical Sciences*. 2022. No. 1(5), pp. 49-55. DOI 10.18572/2686-8598-2022-5-1-49-55.
19. M.I. Grachev, V.G. Burlov, "Mathematical modeling in social and economic systems," *T-Comm*. 2021. Vol. 15. No. 5, pp. 38-45. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-5-38-45.
20. M.I. Grachev, "Increasing the efficiency of an organization based on the automation criterion," *Intelligent systems in production*. 2023. Vol. 21. No. 3, pp. 144-150. DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-144-150.
21. A.A. Bezhentsev, V.G. Burlov, M.I. Grachev, "Introduction of new information technologies into the educational process based on the use of training grounds, monitoring center and situation center," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 7, pp. 36-41. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-7-36-41.
22. V.G. Burlov, M.I. Grachev, "Analytical and dynamic model of managerial decision in socio-economic systems on the example of the head of an educational institution of higher education," *T-Comm*. 2019. Vol. 13, No. 10, pp. 27-34. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10314.
23. O.A. Malafeev, I.V. Zaitseva, D.V. Shlaev et al., "Modeling the process of interaction in an information and computing network as systems with Markov processes," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Instrumentation*. 2021. Vol. 64, No. 6, pp. 444-451. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-6-444-451.

Information about authors:

Mikhail I. Grachev, Research Associate, Saint Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Saint Petersburg, Russia
Vyacheslav G. Burlov, Professor at the Higher School of Technosphere Safety, Doctor of Technical Sciences, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ШИРОТ ИНТЕРВАЛОВ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАНГОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СПИРМЕНА

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

Шешера Николай Геннадьевич,
Дальневосточного юридического института МВД России,
г. Хабаровск, Россия, kolyaka239@mail.ru

Григоров Денис Евгеньевич,
Дальневосточного юридического института МВД России,
г. Хабаровск, Россия, glowfish8lan@gmail.com

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-34-40

Manuscript received 20 February 2024;
Accepted 15 March 2024

Ключевые слова: интенсивность транспортных потоков, погодные условия, температурные режимы (воздуха, почвы, точки росы).

Неуклонный рост уровня автомобилизации неизбежно приводит к перегруженности элементов УДС в городах нашей страны. Интенсивность движения автомобильного транспорта является важным показателем аварийности, так как определяет режимы и условия возникновения аварийно-опасных участков. Следствием ДТП является большое количество факторов системы Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда (ВАДС). Для прогнозирования этого негативного явления, которое считается сбоем в гармонично функционирующей транспортной инфраструктуре, необходимо изучить сопутствующие условия и их влияние друг на друга с подробной детализацией. Таким образом, для проведения необходимых реконструкционных мероприятий на аварийно-опасных участках требуется осуществление качественных расчетов, направленных на оценку эффективности предлагаемых мероприятий при оптимальной конфигурации элементов. Рассматривается программный подход к предварительному анализу с целью определения закономерностей взаимодействия сложно связанных подсистем ВАДС. Определение и обоснование эффективных широт данных для группировки с целью дальнейшего исследования. Данные исследования являются новым витком в совершенствовании системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах. Комплексное решение, в предложенном авторами статьи варианте, оказывает прямое влияние на управление транспортными потоками в безаварийном режиме, которое ранее не было разработано и не применялось, это является научной новизной работы.

Информация об авторах:

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

Шешера Николай Геннадьевич, доцент кафедры информационного и технического обеспечения ОВДб канд. техн. наук, Дальневосточного юридического института МВД России, г. Хабаровск, Россия

Григоров Денис Евгеньевич, начальник кабинета специальных дисциплин кафедры информационного и технического обеспечения ОВД, Дальневосточного юридического института МВД России, г. Хабаровск, Россия

Для цитирования:

Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Определение эффективных широт интервалов влияния температурных режимов на интенсивность транспортного потока с использованием ранговой корреляции Спирмена // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 34-40.

For citation:

Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigоров D.E. (2024) Determining the effective latitudes of intervals of the influence of temperature regimes on the intensity of traffic flow using spearman's rank correlation. T-Comm, vol. 18, no. 3, pp. 34-40. (in Russian)

Введение

Таблица 1

На интенсивность транспортного потока оказывают влияние большое количество признаков. Одни могут быть постоянными (ширина дороги, количество полос, светофорное регулирование и т.д.), другие изменяться в течении дня (погодные условия). Первые определяют режимы интенсивности на постоянной основе в разные показатели качественных переменных (день недели, время суток и т.д.), вторые не имеют системности, но значительно корректируют режимы первого. Для прогнозирования интенсивности транспортного потока необходим комплексный анализ всех характеристик [1, 2].

Влияние внешней среды на систему ВАДС является важным аспектом безопасности и эффективности дорожного движения. Окружающая обстановка на дороге может создавать различные условия, которые формируют поведение водителя, состояние автомобиля и безопасность на дороге в целом.

Сложно организованная система взаимодействия факторов ВАДС определяет главные и второстепенные признаки. Взаимодействие между ними может затруднить понимание и изучение причинно-следственных связей, так как эффект одного фактора может проявляться только при наличии или влиянии других.

В таких случаях роль статистического анализа и моделирования становится важной. С помощью этих методов можно выявить главные и второстепенные признаки, а также определить силу влияния каждого фактора на итоговый результат.

Условия взаимодействия факторов сложны и понимание их может быть непростой задачей. Дополнительные исследования и эксперименты необходимы для углубленного изучения сложных связей системы ВАДС.

Результаты исследований

Привычные способы приведения интенсивности транспортного потока были созданы во времена низкого уровня автомобилизации населения, путем ручного подсчета транспортных средств. Для углубленного изучения рассматриваемых характеристик необходим большой объем статистических данных.

В некрытых городах России, для повышения безопасности дорожного движения активно развивают системы видеонаблюдения и модернизируются программно-аппаратные комплексы с целью автоматизированного принятия решений по управлению транспортным узлом или фиксации административных правонарушений (<https://www.integra-s.ru/sistema-fotovideofiksatsii/>; Паклин Н. Логистическая регрессия и ROC-анализ – математический аппарат: <https://basegroup.ru/community/articles/logistic>). Данные для анализа поступают в вычислительное устройство с камер наблюдения. Все транспортные средства проезжая через участок контроля (рубеж), подлежат учету. Формируется список автомобилей каждая запись которого состоит из даты, времени проезда, номера рубежа контроля и т.д.

В городе Хабаровске широкое применение нашла система *INTEGRO-КДД*, которая в круглосуточном режиме ведет подсчет автомобилей на 107 рубежах контроля (табл. 1) и с отсутствием необходимости приведения показателей интенсивности корректировочными формулами к относительным, статистика, полученная таким способом, имеет высокую точность.

Участки контроля программно-аппаратных комплексов

№ п/п	Участок, пересечение проезжих частей	Номер рубежа контроля
1	Амурский бульвар – Льва Толстого	5211, 5221, 5231
2	Большая – Воронежская	1511, 1521, 1531, 1541
3	Большая – Вяземская	4011, 4021
4	Большая – Демьяна Бедного	4111, 4121
5	Волочаевская – Уссурийский бульвар	3911, 3921
6	Гамарника – Слободская	711, 721
7	Дикопольцева – Уссурийский бульвар	611, 621
8	К. Маркса – Дикопольцева	1111, 1121, 1131, 1141
9	К. Маркса – Пушкина	911, 921, 931, 941
10	К.Маркса – Выборская	111, 121
11	К.Маркса – Матвеевское шоссе	5311, 5321, 5331
12	К.Маркса – Московская	2911, 2921
13	К.Маркса – Промышленная	811, 821
14	Калинина – Уссурийский бульвар	3811, 3821
15	Ленина – Волочаевская	1711, 1721, 1731
16	Ленина – Дзержинского	1411, 1421, 1431
17	Ленина – Дикопольцева	1911, 1921, 1931, 1941
18	Ленина – Запарина	2211, 2221
19	Ленина – Калинина	1011, 1021, 1031
20	Ленина – Ленинградская	2011, 2021, 2031
21	Ленина – Пушкина	1811, 1821
22	Ленина – Шеронова	3511, 3521, 3531, 3541
23	Ленинградская – Амурский бульвар	3311, 3321
24	Ленинградская – Ким Ю Чена	3111, 3121
25	Ленинградская – пер. Батарейный	3711, 3721
26	Ленинградская, дом 32	5111, 5121
27	Муравьева Амурского – Волочаевская	2411, 2421, 2431
28	Муравьева Амурского – Дзержинского	1311, 1321, 1331
29	Муравьева Амурского – Запарина	2311, 2321, 2331
30	Муравьева Амурского – Калинина	1211, 1221, 1231
31	Муравьева Амурского – Тургенева	2111, 2121
32	Муравьева Амурского – Шеронова	3411, 3421, 3431, 3441
33	Муравьева Амурского – Комсомольская	2511, 2521, 2531, 2541
34	Пушкина – Уссурийский бульвар	511, 521, 531
35	Серышева – Калинина	311, 321
36	Серышева – Некрасова	3211, 3221
37	Серышева – Станционная	411, 421, 431
38	Большая – Лазо	7311, 7321, 7331, 7341
39	Ленина – Лермонтова	5411, 5421, 5431

С целью накопления данных о погодных условиях использовались открытые веб ресурсы *OpenWeatherMap* и *Gismeteo*, так как они приспособлены для работы с данными в режиме разработчика с перспективой автоматизировать процесс обращения к ним.

OpenWeatherMap – онлайн сервис для доступа к данным о текущей погоде, прогнозам и историческим данным. В каче-

стве источника данных используются официальные метеорологические службы, данные из метеостанций аэропортов и данные с частных метеостанций.

Gismeteo – это метеорологический ресурс при помощи которого можно узнать текущую погоду, а также получить прогноз температуры, осадков и других необходимых параметров в различных пунктах по всей Земле. Метеоданные поступают от метеорологических центров, а прогнозы строятся на основе разработанных математических моделей.

С целью определения сложных взаимосвязей подсистем ВАДС и обоснования влияния различных погодных условий на интенсивность транспортного потока было решено провести корреляционный анализ.

Корреляционный анализ – это статистический метод, который позволяет определить степень и направление связи между двумя или более переменными.

Большой объем статистических данных требует группировки (распределение на интервалы), это необходимо для удобства анализа, представления информации и улучшения прогностических возможностей. Она может быть осуществлена с помощью различных методов, таких как определение равных интервалов, интервалов на основе процентов, экспертное мнение и так далее. Важно балансировать между упрощением данных и сохранением релевантной информации в процессе группировки [3, 4].

Современные программные возможности способны вычислять оптимальные варианты решений для анализа пользователю, предлагая различные толщину интервалы для переменных. С целью определения наилучшего интервала было решено провести ранговую корреляцию Спирмена. Каждый интервал – это количество наблюдаемых случаев в нем, соответственно, обычным корреляционным анализом оценить значимость переменной было бы необъективно. С использованием ранговой системы в одном интервале (пример: 0...200 – 1 ранг, 200...400 – 2 ранг, 400...600 – 3 ранг и т.д.) эта проблема решается.

Ранговая корреляция Спирмена – это статистический метод, используемый для измерения силы и направления связи между двумя ранжированными переменными. Он является аналогом классической (пирсоновской) корреляции для случаев, когда данные не являются нормально распределенными или содержат выбросы [5].

При рассмотрении пары переменных, каждой переменной присваиваются ранги в порядке возрастания или убывания. Затем вычисляется разница между рангами в каждой паре наблюдений для каждой переменной. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена определяется как средняя корреляция между этими разностями рангов для двух переменных [5, 6].

Значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена находится в диапазоне от -1 до +1. Значение +1 указывает на положительную связь, когда значения обеих переменных возрастают или убывают вместе. Значение -1 указывает на отрицательную связь, когда значения одной переменной возрастают, а значения другой переменной убывают. Значение 0 указывает на отсутствие связи между переменными.

Ранговая корреляция Спирмена имеет несколько преимуществ по сравнению с корреляцией Пирсона, так как она более устойчива к выбросам и не требует нормального распределения данных. Ее можно вычислить с помощью множества

статистических программ и языков программирования, включая Python, R и SPSS.

Для анализа степени влияния температурных режимов (температура воздуха, почвы и точки росы) на интенсивность транспортного потока, в первую очередь, необходимо определить наиболее эффективные широты интервалов всех переменных [7].

Стоит учесть, что при определении степени влияния зависимой переменной на независимую достаточно применить парную корреляцию. Но в данной работе влияние температурных режимов на интенсивность транспортного потока рассматривалась в совокупности, так как независимые переменные (температура воздуха, почвы и точки росы) имеют общие причины (например, изменение времени года) и одновременно влияют на зависимый признак [8-10].

Приняты следующие широты интервалов для анализа наибольшей эффективности:

- интенсивность движения транспортного потока (100, 200, 300, 400, 500, 600);

- температура воздуха, почвы, точки росы (5, 10, 15, 20, 25).

Влияние температурных режимов на интенсивность транспортного потока может зависеть от дополнительных характеристик, таких как «День недели», «Время суток», «Осадки». Выходные дни не вынуждают рабочее население двигаться из спальных районов в рабочие утром, а вечером наоборот. Люди определяют свое желание на перемещение личным комфортом. Жаркий или холодный день, дождь или снег значительно влияют на эмоциональный фон, соответственно, люди в поисках уюта в выходные дни люди предпочитают оставаться дома.

Учитывая особенности дополнительных характеристик, каждая широта интервала интенсивности и температур воздуха, почвы и точки росы рассматривались не только со всеми возможными своими комбинациями для определения зависимости или наиболее значимых широт интервалов, но и во всех показателях дней недели и времени суток [11, 12].

Для решения такой сложной задачи была разработана программа на языке программирования python, реализация которой условно можно разделить на 4 блока:

1. Импортируем необходимые библиотеки (*datetime* – для работы с данными типа – время; *pandas* – обработка массивов данных; *spearmanf* – ранговая корреляция Спирмена). Открываем заготовленную для анализа выборку *Restruct_25.xlsx* и меняем файлу имя на *int*, а формат на *csv*. Используя команду *drop* библиотеки *pandas* убираем ненужные колонки чтоб снизить время обработки массива (рис. 1).

```
import datetime
import pandas as pd
from scipy.stats import spearmanr
import numpy as np

print("Имя папки")
df = pd.read_excel('files/Restruct_25.xlsx', sheet_name='1311', engine='openpyxl')
df.to_csv('files/int.csv', header=True, index=None, sep=';', mode='w', encoding='utf-8-sig')
"""Удаляем лишние столбцы"""
df = df.drop(columns=['Дата и время', 'Русск'], axis=1)
# print(df['Осадки мм'])
df['Осадки мм'] = df['Осадки мм'].replace(np.NaN, 0)
# print(df['Осадки мм'])

"""Определяем списки анализируемых вариантов и интервалов"""
list_int = [100, 200, 300, 400, 500, 600] # интенсивность
list_temp = [5, 10, 15, 20, 25] # температура
list_time = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] # время
list_day = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] # день

"""Создаем базу с ключами"""
data = {'p_air': [], 'p_soil': [], 'p_dew': [], 'rho_air': [], 'rho_soil': [],
        'rho_dew': [], 'day': [], 'time': [], 't_air': [], 't_soil': [], 't_dew': [], 'int': []}
```

Рис. 1. Подготовка программы и данных для обработки массива

Для анализа была взята выборка (Restruct_25.xlsx) с рубежа контроля 1311, пересечения улиц Муравьева Амурского – Дзержинского г. Хабаровска, содержащая 8115 записей об интенсивности и погодных условиях в период и в пределах работы камеры (рис. 2, табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент данных с рубежа 1311 пересечения улиц Муравьева Амурского – Дзержинского (17 записей)

Дата и время	День недели	Время суток	Инт-ть	t (воз-дух)	t (почва)	t (росы)	Осадки мм	Рубеж
01.08.18 20:00	3	20:00	658	23.23	22.33	16.56	0	1311
01.08.18 21:00	3	21:00	371	22.26	20.66	16.63	0	1311
01.08.18 22:00	3	22:00	108	21.3	19	16.7	0	1311
01.08.18 23:00	3	23:00	69	20.86	19	16.73	0	1311
02.08.18 0:00	4	0:00	61	20.43	19	16.76	0	1311
02.08.18 1:00	4	1:00	39	20	19	16.8	0	1311
02.08.18 2:00	4	2:00	20	19.43	18.33	16.63	0	1311
02.08.18 3:00	4	3:00	9	18.86	17.66	16.46	0	1311
02.08.18 4:00	4	4:00	11	18.3	17	16.3	0	1311
02.08.18 6:00	4	6:00	8	17.9	17.66	15.43	0.2	1311
02.08.18 7:00	4	7:00	101	17.7	18	15	0.3	1311
02.08.18 8:00	4	8:00	496	19.2	21.66	14.5	0.2	1311
02.08.18 9:00	4	9:00	885	20.7	25.33	14	0.1	1311
02.08.18 10:00	4	10:00	747	22.2	29	13.5	0	1311
02.08.18 11:00	4	11:00	810	23.23	31.66	13.7	0	1311
02.08.18 12:00	4	12:00	875	24.26	34.33	13.9	0	1311
02.08.18 13:00	4	13:00	814	25.3	37	14.1	0	1311

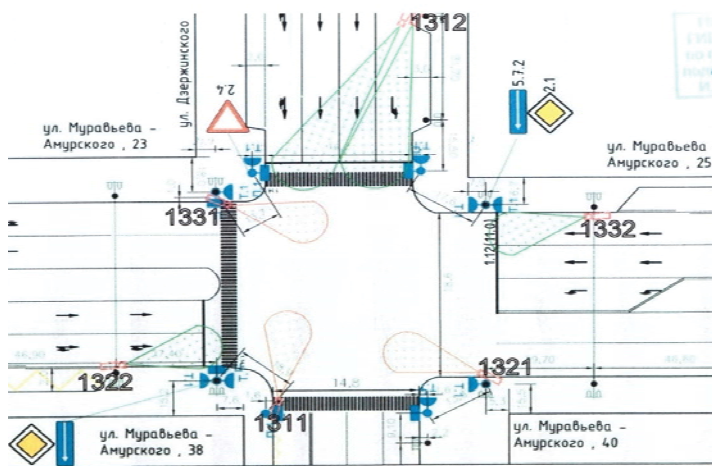


Рис. 2. Схема перекрестка с установленными на нем рубежами контроля полос (1311, 1321, 1331)

Подготовлены четыре итерируемых списка (рис. 1), для различных показателей дней недели (list_day) и времени суток (list_time), подбора различных вариантов толщин интервалов температурных режимов (температура воздуха, почвы и точки росы – list_temp) и интенсивности транспортного потока (list_int).

Создаем список массивов с ключами командой: `data = {'p': [], 'rho': [], 'day': [], 'time': [], 't_air': [], 't_soil': [], 't_dew': [], 'int': []}`, где:

- p – вероятность ошибки;
- rho – коэффициент ранговой корреляции Спирмена;
- time – время;
- t_air – ширина интервала температура воздуха;
- t_soil – ширина интервала температура почвы;
- t_dew – ширина интервала температуры точки росы;
- int – ширина интервала интенсивности транспортного потока.

Вероятность ошибки Спирмена, также известная как уровень значимости или р-значение, является статистической мерой, которая используется для определения статистической значимости ранговой корреляции Спирмена между двумя наборами данных. Она оценивает вероятность получения наблюдаемой или более экстремальной корреляции, если нулевая гипотеза (отсутствие корреляции) верна [13, 14].

Обычно, если значение р-значения меньше определенного уровня значимости (например, 0.05), мы отвергаем нулевую гипотезу и считаем корреляцию статистически значимой [15].

Важно осознавать, что вероятность ошибки (р-значение) не определяет силу или величину корреляции, а является статистической мерой значимости. Более низкое значение р-значения указывает на большую уверенность в отвержении нулевой гипотезы и наличии корреляции [16, 17].

2. При помощи функций for (управляющая конструкция, которая позволяет выполнять повторяющиеся операции или действия определенное количество раз) перебираем списки широт интервалов и уникальных значений таким образом, чтобы каждая функция внутри себя запускала другую. Принцип вложенности можно объяснить аналогией - в каждом часе перебираются минуты, в каждой минуте секунды. Таким образом мы строим дерево уникальных комбинаций (рис. 3).

```

***Генерируем интервалы для интенсивности***
for interval_int in list_int:
    interval_range = pd.IntervalRange(start=0, freq=interval_int, end=200000)
    df['int_var'] = pd.cut(df['Интенсивность'], bins=interval_range, labels=[1, 2, 3])
***Генерируем интервалы для температуры воздуха***
for interval_air in list_temp:
    interval_t = pd.IntervalRange(start=-40, freq=interval_air, end=100)
    df['interval_t_air'] = pd.cut(df['t (воздух)'], bins=interval_t, labels=[1, 2, 3])
***Генерируем интервалы для температуры почвы***
for interval_soil in list_temp:
    interval_t_soil = pd.IntervalRange(start=-40, freq=interval_soil, end=100)
    df['interval_t_soil'] = pd.cut(df['t (почва)'], bins=interval_t_soil, labels=[1, 2, 3])
***Генерируем интервалы для температуры точки росы***
for interval_dew in list_temp:
    interval_t_dew = pd.IntervalRange(start=-40, freq=interval_dew, end=100)
    df['interval_t_dew'] = pd.cut(df['t (росы)'], bins=interval_t_dew, labels=[1, 2, 3])
***Генерируем различные варианты времени суток***
for interval_time in list_time:
    df1 = df[(df['Время суток'] == datetime.time(interval_time, 0))]
***Генерируем различные варианты дней недели***
for interval_day in list_day:
    df2 = df1[(df1['День недели'] == interval_day) & (df1['Осадки мм'] == 0)]
    
```

Рис. 3. Процесс обработки данных с использованием функции for

Внутри каждой функции происходят преобразования в соответствии с условиями. Для температурных режимов (температура воздуха, почвы и точки росы) и интенсивности транспортного потока на каждом цикле присваиваются из

списка поочередно толщины интервалов, а для дней недели и времени суток свои уникальные значения (рис. 3).

Для чистоты эксперимента дополнительно был введен параметр – «Осадки» показатель которого учитывался только равный 0 (рис. 3). Осадки, в данном случае, это аномалии, которые лучше исключить.

3. На последнем цикле (конечной функции for) помещаются команды для ранговой корреляции Спирмена (rho, $r = \text{spearmanr}()$) (рис. 4), сущность которой заключается в том, что для рассматриваемых данных на одной итерации подбирается уникальный вариант дня недели, времени суток, широты интенсивности и температурных режимов (воздуха, почвы и точки росы). В этом варианте широтам интервалов интенсивности и температурных режимов (воздуха, почвы и точки росы) присваиваются ранги и между ними проводится корреляционный анализ. Следующий цикл меняет один из элементов и повторно проводится ранговая корреляция Спирмена.

```
"""Ранговая корреляция Спирмена"""
"""Вычислить ранговую корреляцию Спирмена и соответствующее значение р"""
rho1, p1 = spearmanr(df2["инт_шар"], df2["interval_t_air"], nan_policy='omit')
rho2, p2 = spearmanr(df2["инт_шар"], df2["interval_t_soil"], nan_policy='omit')
rho3, p3 = spearmanr(df2["инт_шар"], df2["interval_t_dew"], nan_policy='omit')
```

Рис. 4. Ранговая корреляция Спирмена на языке программирования Python

При коэффициентах корреляции, близких к 0, считается, что статистическая линейная связь между признаками отсутствует; при абсолютных значениях коэффициентов, меньших 0,3, – связь слабая; при значениях 0,3...0,5 – связь умеренная; при 0,5...0,7 – связь значительная; при 0,7...0,9 – связь сильная; если значения коэффициентов больше 0,9, то связь считается очень сильной; если коэффициенты равны +1 или -1, то говорится о функциональной связи.

Для отбора лучших вариантов был создан критерий записи и учета: $-0.7 > \text{rho} > 0.7$, а $p < 0.05$ (рис. 5). Это позволило исключить неэффективные комбинации и из 126000 вариантов оставить только 367 статистически значимых.

```
"""Выделяем только значимые р и rho"""
if (p1 < 0.05) & (rho1 > 0.7 or rho1 < -0.7) & \
    (p2 < 0.05) & (rho2 > 0.7 or rho2 < -0.7) & \
    (p3 < 0.05) & (rho3 > 0.7 or rho3 < -0.7):
```

Рис. 5. Команда отбора статистически значимых rho и p на языке программирования Python

4. После корреляции и фильтрации данных передаем их в заранее заготовленную базу и записываем в файл (рис. 1, 6, табл. 2).

```
"""Записываем значения различных вариантов,
интервалов и лучших показателей корреляции в созданную базу"""
data['p_air'].append('{:0.16f}'.format(p1))
data['p_soil'].append('{:0.16f}'.format(p2))
data['p_dew'].append('{:0.16f}'.format(p3))
data['rho_air'].append(rho1)
data['rho_soil'].append(rho2)
data['rho_dew'].append(rho3)
data['t_air'].append(interval_air)
data['t_soil'].append(interval_soil)
data['t_dew'].append(interval_dew)
data['int'].append(interval_int)
data['day'].append(interval_day)
data['time'].append(interval_time)

"""Записываем базу в файл"""
frame = pd.DataFrame(data) # собираем фрейм
frame.to_csv('correl.csv', header=True, index=False, sep=';', encoding='utf-8-sig')
```

Рис. 6. Записываем данные в заранее заготовленные массивы, а потом в файл

Фрагмент данных ранговой корреляции Спирмена эффективных широт интенсивности транспортного потока и температурных режимов (воздуха, почвы и точки росы)

p_air	p_soil	p_dew	rho_air	rho_soil	rho_dew	day	time	t_air	t_soil	t_dew	int
4.6E-10	2.17E-09	4.95E-10	-0.79	-0.77	-0.79	7	17	5	5	5	100
4.6E-10	2.17E-09	3.27E-09	-0.79	-0.77	-0.77	7	17	5	5	10	100
4.6E-10	2.17E-09	1.66E-09	-0.79	-0.77	-0.78	7	17	5	5	15	100
4.6E-10	2.17E-09	2.07E-07	-0.79	-0.77	-0.7	7	17	5	5	25	100
4.6E-10	1.38E-08	4.95E-10	-0.79	-0.75	-0.79	7	17	5	10	5	100
1.4E-10	1.59E-09	2.27E-08	-0.8	-0.78	-0.74	7	17	10	5	10	200
1.4E-10	1.59E-09	4.87E-08	-0.8	-0.78	-0.73	7	17	10	5	15	200
1.4E-10	1.02E-08	5.42E-09	-0.8	-0.75	-0.76	7	17	10	10	5	200
1.4E-10	1.02E-08	2.27E-08	-0.8	-0.75	-0.74	7	17	10	10	10	200
4.6E-10	3.21E-09	3.27E-09	-0.79	-0.77	-0.77	7	17	5	25	10	100
7.1E-10	1.73E-07	1.16E-08	-0.81	-0.73	-0.77	6	17	25	10	20	300
7.1E-10	1.73E-07	5.9E-07	-0.81	-0.73	-0.71	6	17	25	10	25	300
7.1E-10	1.75E-07	5.53E-08	-0.81	-0.73	-0.75	6	17	25	15	5	300
7.1E-10	1.75E-07	2.8E-08	-0.81	-0.73	-0.76	6	17	25	15	10	300
7.1E-10	1.75E-07	1.96E-08	-0.81	-0.73	-0.77	6	17	25	15	15	300
9.8E-09	1.65E-08	1.23E-07	-0.75	-0.74	-0.71	7	17	15	10	5	400
9.8E-09	1.65E-08	2.26E-07	-0.75	-0.74	-0.7	7	17	15	10	15	400
8.4E-08	1.37E-07	5.48E-08	0.738	0.73	0.74	1	8	15	10	20	500
9.9E-07	1.22E-07	2.06E-08	0.729	0.77	0.79	5	8	15	10	20	500

Всего 367 вариантов с сильной корреляционной связью и вероятностью ошибки меньше 0,05. Для интенсивности транспортного потока было отобраны:

- 60 вариантов с шириной 100 авт/час;
- 75 вариантов с шириной 200 авт/час;
- 60 вариантов с шириной 300 авт/час;
- 40 вариантов с шириной 400 авт/час;
- 132 вариантов с шириной 500 авт/час.

Цель данной работы определить эффективные широты интервалов для прогнозирования интенсивности транспортного потока. Генерируя разные варианты, мы получили 367 удовлетворяющих нас комбинаций для температурных режимов и интенсивности транспортного потока. Выбрать необходимо только один. Учитывая, что зависимый признак – интенсивность, ориентир в первую очередь на него. Для подробной детализации можно выбрать ширину интервала 100, а для достоверности выводов 500, так как данная ширина встречается чаще. Но не стоит забывать, что исследования связей на этом не заканчиваются, существуют еще характеристики погодных условий, с которыми выбранная на первом этапе исследований ширина интенсивности транспортного потока может быть неэффективна.

Концепция определения широт интервала интенсивности транспортного потока и температурных режимов будет выглядеть следующим образом. Забегая вперед, предположим,

Литература

что все рассматриваемые независимые переменные (не только температурные режимы) имеют хорошую связь с шириной интервала интенсивности 100 авт/час. В пределах исследуемого города – Хабаровска, где на одном рубеже интенсивность транспортных потоков может достигать до 5000 авт/час – этот карман можно считать вполне детализированным и интервалы с ним будут выглядеть так: 0-100; 101-200; 201-300 ... 4901-5000.

Выбрав ширину интервала интенсивности 100 авт/час, включаем все остальные из полученной таблицы (табл. 2). Среди 60 оставшихся значений выбираем ширину интервала второго по значимости фактора – температуры воздуха (5, 10, 15, 20, 25), для каждого из которых получилось по 12 вариантов. С целью выполнения критерия – подробной детализации дальнейшего анализа выбираем наименьшую ширину, равную 5°C (-40...-35, -35...-20,1, -20...-15,1 и т.д.).

Используя такую же методику, оставив интервал шага для температуры воздуха - 5°C и убрав все остальные выбираем ширину интервала температуры почвы, а потом и точки россы.

В результате получились следующие эффективные широты интервалов:

- Интенсивность транспортного потока – 100 авт/час;
- Температура воздуха – 5°C;
- Температура почвы – 5°C;
- Температура точки росы – 5°C.

Но не стоит считать данные показатели широт интервалов окончательными. В перечень погодных условий, влияющих на интенсивность транспортного потока, входят еще много показателей, например, атмосферное давление, относительная влажность, скорость ветра и т.д. Анализ эффективных широт данных показателей может противоречить ранее полученным результатам. Если, например, показатель – относительной влажности воздуха неэффективно взаимодействует с шириной интервала интенсивности транспортного потока равной 100 авт/час, то было бы рационально ее изменить. Исследования показали, что есть и другие широты интервалов интенсивности транспортного потока, которые оказывают влияние на температурные режимы (воздуха, почвы, точки росы) и нужно подобрать такой, который удовлетворял бы все независимые переменные в тоже время лучше всего описывал зависимость.

Заключение

Данные исследования являются новым витком в совершенствовании системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах. Комплексное решение, в предложенном авторами статьи варианте, оказывает прямое влияние на управление транспортными потоками в безаварийном режиме, которое ранее не было разработано и не применялось, это является научной новизной работы. Разработанные программные решения позволили рационально подобрать широты интервалов интенсивности транспортного потока и температурных режимов (воздуха, почвы, точки росы) с учетом наивысшей степени влияния зависимых переменных на независимую и наименьшей вероятности ошибки. Сама программная концепция применима для исследования других погодно-климатических факторов, оказывающих влияние на интенсивность транспортного потока.

1. *Бабков В.Ф.* Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.

2. *Пугачев И.Н., Куликов Ю.И.* Взгляд на цифровую трансформацию транспортной инфраструктуры России, в условия мирового тренда развития цифровизации на транспорте // Научные труды международной научно-технической конференции Транспорт: актуальные задачи и инновации (22 апреля 2021 г.). Коллектив авторов/Под ред. проф. Б.Х. Тураев. Ташкент «ТГТУ», 2021. С. 34-42.

3. *Пугачев И.Н., Шешера Н.Г.* Влияние величины продольного уклона на ДТП с травматизмом // Наука и Техника в дорожной отрасли. №3. 2020. С. 4-7.

4. *Пугачев И.Н., Лобашев А.О., Семченков С.С.* и др. Планирование устойчивой городской мобильности : монография; под общ. ред. И.Н. Пугачева. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2023. 147 с.

5. Эксплуатация автомобильных дорог : учебное пособие / сост.: И.Н. Пугачев, А.В. Каменчуков, Н.С. Нестерова. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2022. 168 с.

6. *Пугачев И.Н., Каменчуков А.В., Капский Д.В.* и др. Управление безопасностью дорожной инфраструктуры : учебное пособие; под общ. ред. И.Н. Пугачева. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2022. 147 с.

7. *Пугачев И.Н., Щеглов В.И.* Реализация программ комплексного развития транспортных инфраструктур агломераций и соседствующих субъектов Российской Федерации на основе создания информационной системы // Транспорт и сервис. Вып.9. 2021. С. 7-15.

8. *Пугачев И.Н., Капский Д. В., Кузьменко В. Н.* и др. Исследования показателей эффективности транспортной системы симбиотического города // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса : материалы национальной научно-практической конференции; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Тихоокеанский государственный университет. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2021. Вып. 21. (Научные чтения памяти профессора М.П. Даниловского). С. 137-148.

9. *Пугачев И.Н.* Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2010.

10. *Пугачев И.Н., Тормозов В.С.* Разработка нового метода детектирования и классификация транспортных средств по спутниковым изображениям // Дороги и мосты. Вып. 49-1. 2023. С. 199-221.

11. *Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Каменчуков А.В.* Совершенствование методов оценки качества и безопасности дорожного движения. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 139 с.

12. *Пугачев И.Н., Шешера Н.Г.* Применение методов статистического анализа для оценки параметров транспортных потоков и характеристик улично-дорожной сети // Дальневост. юрид. ин-т МВД России. Хабаровск: РИО ДВЮИ МВД России. 2020. 108 с.

13. *Ваксман С.А.* Проблемы развития и организации функционирования транспортных систем городов // Проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы VIII международной (одинадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции. Екатеринбург: УрГЭУ, 2002. С. 5-9.

14. *Пугачев И.Н., Шешера Н.Г.* Применение методики коэффициентов травматизма в целях контроля качества будущих и эксплуатируемых дорог // Качество и жизнь. 2016. № 1 (9). С. 58-61.

15. *Ярмолинский А.И., Пугачев И.Н., Шешера Н.Г.* Совершенствование методики оценки аварийности автомобильных дорог по степени обеспечения безопасности движения в городских условиях // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 3 (42). С. 33-42.

16. *Pugachev I., Kulikov Y., Markelov G., Sheshera N.* Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems // 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017, pp. 529-535.

17. *Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Щеглов В.И.* Анализ геометрических элементов дорог с помощью современных геоинформационных систем при оценке их аварийности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 127-133.

DETERMINING THE EFFECTIVE LATITUDES OF INTERVALS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIMES ON THE INTENSITY OF TRAFFIC FLOW USING SPEARMAN'S RANK CORRELATION

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

Nikolai G. Sheshera, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Russia, Khabarovsk, kolyaka239@mail.ru

Denis E. Grigorov, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Russia, Khabarovsk, glowfisch8lan@gmail.com

Abstract

The steady increase in the level of motorization inevitably leads to overloading of road traffic systems in the cities of our country. The intensity of road transport traffic is an important indicator of accident rates, as it determines the modes and conditions for the occurrence of accident-hazardous areas. The consequence of an accident is a large number of factors of the Driver-Vehicle-Road-Environment (VADS) system. To predict this negative phenomenon, which is considered a failure in a harmoniously functioning transport infrastructure, it is necessary to study the accompanying conditions and their influence on each other in detail. Thus, in order to carry out the necessary reconstruction measures in accident-prone areas, it is necessary to carry out high-quality calculations aimed at assessing the effectiveness of the proposed measures with an optimal configuration of elements. This article discusses a software approach to preliminary analysis in order to determine the patterns of interaction of complexly connected VADS subsystems. Determination and justification of effective data latitudes for grouping for the purpose of further research. These studies are a new step in improving the road safety system, striving for zero deaths on roads. The complex solution, in the version proposed by the authors of the article, has a direct impact on the management of traffic flows in an accident-free mode, which has not previously been developed or applied; this is the scientific novelty of the work.

Keywords: intensity of flows, weather conditions, temperature conditions (air, ground, dew points).

References

1. V.F. Babkov, "Road conditions and traffic safety," Moscow: Transport, 1993. 271 p.
2. I.N. Pugachev, Yu.I. Kulikov, "A look at the digital transformation of transport employment in Russia, in the context of the global trend of development of digitalization in transport," *Scientific proceedings of the international scientific and technical conference "Transport: current challenges and innovations" (April 22, 2021 G.)*. Team of authors / Edited by prof. B.H. Turaev. Tashkent "TSTU", 2021, pp. 34-42.
3. I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, "Estimation of the magnitude of a small slope in road accidents with injuries," *Science and technology in the road industry*. No. 3. 2020, pp. 4-7.
4. I.N. Pugachev, A.O. Lobashev, S.S. Semchenkov et al., "Planning for sustainable urban mobility: monograph," under general ed. I. N. Pugacheva. Khabarovsk: Publishing house DVGUPS, 2023. 147 p.
5. I.N. Pugachev, A.V. Kamenchukov, N.S. Nesterova, "Operation of highways: textbook," Khabarovsk: Publishing house DVGUPS, 2022. 168 p.
6. I.N. Pugachev, A.V. Kamenchukov, D.V. Kapsky et al., "Road safety management: textbook by," under general ed. I. N. Pugacheva. Khabarovsk: Publishing house DVGUPS, 2022. 147 p.
7. I.N. Pugachev, V.I. Shcheglov, "Implementation of programs for the integrated development of infrastructure of agglomerations and neighboring constituent entities of the Russian Federation based on the creation of information systems," *Transport and service*. Issue 9. 2021, pp. 7-15.
8. I.N. Pugachev, D.V. Kapsky, V.N. Kuzmenko et al., "Research of efficiency indicators of the transport system of a symbiotic city," *Far East: problems of development of the architectural, construction and road transport complex: materials of the National Scientific Research -practical conference / executive editor P. I. Egorov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Pacific State University, Pacific State University. Khabarovsk: Pacific Publishing House. state University, 2021. Issue. 21. (Scientific readings in memory of Professor M.P. Danilovsky)*, pp. 137-148.
9. I.N. Pugachev, "Theoretical principles and methods for improving the efficiency of city systems," Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Ural State University of Transport. Ekaterinburg, 2010.
10. I.N. Pugachev, V.S. Tormozov, "Development of a new method for detecting and classifying vehicles using satellite images," *Roads and Bridges*. Vol. 49-1. 2023, pp. 199-221.
11. I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, A.V. Kamenchukov, "Improving methods for assessing the quality and safety of road traffic," Khabarovsk: Pacific Publishing House. state Univ., 2018. 139 p.
12. I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, "Application of statistical analysis methods for measuring flow parameters and characteristics of the road," *Dalnevost. legal Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. Khabarovsk: RIO DVUI Ministry of Internal Affairs of Russia. 2020. 108 p.
13. S.A. Vaksman, "Problems of development and organization of infrastructure systems of cities," *Problems of development of infrastructure systems of cities and their trade zones: Materials of the VIII International (eleventh Yekaterinburg) scientific and practical conference*. Ekaterinburg: USUE, 2002, pp. 5-9.
14. I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, V.I. Shcheglov, "Application of the methodology of injury rates to control the quality of preserved and accessible assets," *Quality and Life*. 2016. No. 1 (9), pp. 58-61.
15. A.I. Yarmolinsky, I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, "Improvement of methods for assessing the accident rate of highways according to the degree of traffic safety in standard conditions," *Bulletin of the Pacific State University*. 2016. No. 3 (42), pp. 33-42.
16. I. Pugachev, Yu. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera, "Factor analysis of systems of organization and road safety," *12th International Conference "Organization and management of road safety in large cities"*, SPbOTsIK-2016, 28-30 September, 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. pp. 529-535.
17. I.N. Pugachev, N.G. Sheshera, V.I. Shcheglov, "Analysis of geometric elements of roads using modern geographic information systems when assessing their accident rate," *Bulletin of Civil Engineers*. 2021. No. 3 (86), pp. 127-133.

Information about authors:

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

Nikolai G. Sheshera, cand. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Technical Support of the Department of Internal Affairs Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Khabarovsk, Russia

Denis E. Grigorov, head of the office of special disciplines of the Department of Information and Technical Support of the Department of Internal Affairs Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Khabarovsk, Russia

MODEL OF PROCESSES FOR JOINT MAINTENANCE OF REAL-TIME MULTISERVICE TRAFFIC AND ELASTIC DATA TRAFFIC IN A NETWORK OF LOW-POWER MOBILE SUBSCRIBER TERMINALS BASED ON HIGH-THROUGHPUT SATELLITES

Alexander A. Maslov,

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, maslov.aa@mipt.ru

Gennady V. Sebekin,

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, sebekin.gv@mipt.ru

Sergey N. Stepanov,

Moscow Technical University of Communications and Informatics; Kotel'nikov institute of radio engineering and electronics of RAS, Moscow, Russia, s.n.stepanov@mtuci.ru

Alexey O. Shchurkov,

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia, shchurkov.ao@mipt.ru

Aleksander P. Vasilyev,

Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-41-49

Manuscript received 12 February 2024;
Accepted 11 March 2024

Keywords: high-throughput satellites, channel resource, multiservice traffic, real-time traffic, elastic traffic, mobile subscriber terminals

To implement the functions of planning and distributing channel resources in networks of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites in geostationary and highly elliptical orbits, it is necessary to develop models for the joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic. The models should take into account the uneven placement of terminals in local areas, their limited number, the possibility of simultaneous servicing by each terminal of requests for the transmission of two types of traffic, one of which is elastic data traffic, the other real-time traffic, with a limit on the speed of information transfer by the terminal. The purpose of the work is to solve the modeling problem taking into account the listed factors. Model based on multidimensional stepwise Markov processes is constructed. A list of tasks that can be solved using the model is defined, including both the tasks of determining the minimum required network resource to meet the specified quality requirements, and the tasks of finding preferred resource distributions between local areas according to the criterion of minimizing the average service time for data transfer requests. Numerical examples of solving each task are presented. The developed model can be used in the construction of control systems for information transmission networks based on high-throughput satellites.

Для цитирования:

Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов С.Н., Щурков А.О., Васильев А.П. Модели процессов совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных в сети маломощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 41-49.

For citation:

Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N., Shchurkov A.O., Vasilyev A.P. (2024). Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites. *T-Comm*, vol. 18, no.3, pp. 41-49.

1 Introduction

Currently, the Russian Federation is actively working on the development of a satellite constellation, including, inter alia, high-throughput satellites (HTS) in highly elliptical and geostationary orbits, and the creation on this basis of broadband subscriber access systems to public terrestrial networks, in particular, the Internet [1, 2, 23]. At the same time, mobile satellite communication services, especially broadband access for vehicles, are coming to the fore [3]. The possibilities of creating terminals for such systems are confirmed, for example, in [4]. The article considers a broadband satellite network with the topology "star" based on HTS, where low-power subscriber terminals (ST) installed on vehicles in local service areas (LA) of the spacecraft's on-board antenna beams provide drivers with access to services of communication and data transmission via a central earth station (CS) connected to terrestrial telecommunications networks (Fig. 1).

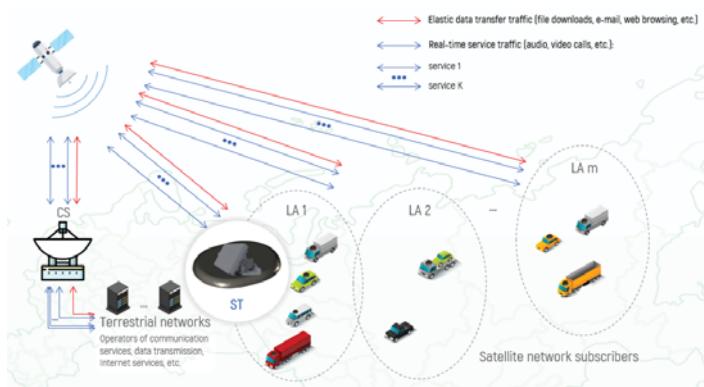


Fig. 1. Network structure

The provision of services is carried out according to requests processed by the CS management system, and depending on the characteristics of the services requires either real-time traffic transmission (for example, for voice or video calling services), or allows delays and changes in the transfer speed (file downloads, e-mail, etc.). Accordingly, traffic on the network can be conditionally split into real-time traffic and elastic traffic. In addition to the uneven distribution of a given number of ST in a certain set of LA, the analyzed network has the following features:

1) Due to the low power, the ST cannot occupy the entire frequency band of the beam, and, accordingly, the maximum transmission speed is limited.

2) ST are personal. Therefore, it can be assumed that drivers use no more than one real-time service at any given time, although data can be exchanged simultaneously (for example, you can hold a telephone conversation and download files or browse web pages, etc.).

The traffic generated when receiving services is serviced by providing the necessary channel resource, which, as a rule, is expressed as an integer number of information transfer speed units (bits/s) [5]. In this case, the speed unit is usually chosen as the largest common divisor of the set of speeds required for transmitting different types of traffic. The quality of network operation is often assessed by such indicators as the proportion of requests for the transmission of traffic of each type, lost due to the lack of a free channel resource, as well as the average service time of the request for data transmission [5].

To solve the tasks of planning and distributing a channel resource in a network of low-power ST based on HTS, it is necessary to develop mathematical models of network functioning processes that allow evaluating the values of quality indicators depending on the volume of resources provided, taking into account the set and characteristics of the services, the number and intensity of ST work, their placement on the LA, accepted procedures for the provision of a resource. The assessment should be carried out both for an individual LA and for the network as a whole. The purpose of this article is to develop these models that take into account the listed features of the ST network.

A large number of papers have been devoted to modeling the processes of servicing multiservice traffic (for example, [6-21]). These issues are considered in relation to various telecommunication networks and applications (to access nodes of mobile communication networks (for example, [6, 14, 15, 16]), The Internet of Things (for example, [10, 11, 14, 17]), surveillance systems (for example, [6, 9]), cloud computer systems (for example, [13]), satellite communication systems (for example, [19-21]). The general approach ([5, 13-21]) involves the assumption of the Poisson nature of the input streams and the exponential distribution of service times and volumes of transferred files, which allows us to build models based on multidimensional stepwise Markov processes that take into account the main specifics of the analyzed systems.

The irreversibility of these processes makes it difficult to obtain analytical results. Estimates of quality indicators are based on the numerical solution of systems of equilibrium equations (SEE). Direct use of the results of the work [5-20] is impossible, because they do not take into account the factors associated with the placement of ST in a set of LA, as well as the admissibility of simultaneous transmission by one ST at a limited speed of two information flows, one of which relates to real-time traffic, the second to elastic traffic. The maintenance of streams generated from several LA is considered in [21], however, the noted features of the ST operation are also not taken into account there. In order to achieve this goal, section 2 builds a mathematical model for the joint maintenance of multiservice traffic on the network. Section 3 is devoted to the characterization of tasks that can be solved using the developed model. Section 4 provides numerical examples of solving such tasks using the model.

2 Mathematical model

Let's first consider a fragment of a network that includes N homogeneous ST of one LA (Fig. 2). Let the resource allocated to the area be ν units. Each ST can simultaneously serve traffic from one of the K real-time services and elastic data traffic.

Note that the case when a subscriber can use no more than one service at a time belongs to the Engset type models, the state of which is determined by the vector of the number of subscribers receiving each service [5]. In the network under consideration, an ST can receive up to two services at once, i.e. this approach is not applicable. The same service characteristics are provided by the ST using the same services at the current time. To account for this circumstance, the state of the ST is denoted by a pair (k, q) , where k is the number of the real-time service from 1 to K or 0, q is one or zero, depending on whether data traffic is currently being serviced or not. Obviously, the total number of ST states is $2(K+1)$. The graph of transitions between states is shown in Figure 3.

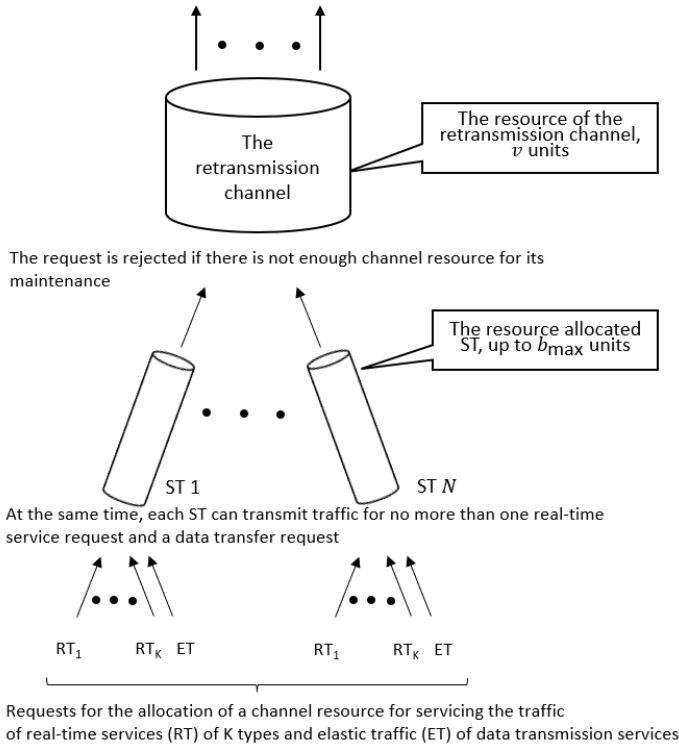


Fig. 2. Features of joint maintenance of real-time and elastic traffic in a separate LA

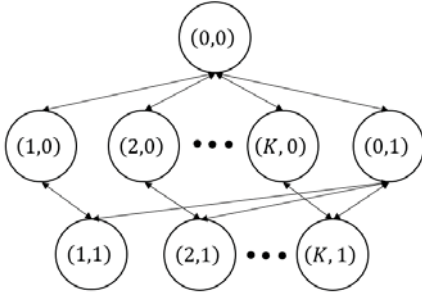


Fig. 3. Graph of transitions between ST states

Let the resource volumes required for servicing requests be given by the vector $(b_1, b_2, \dots, b_K, b_e)$, where b_k ($k=1, 2, \dots, K$) are the resource values for requests for real-time traffic transmission and b_e is the minimum resource for servicing data transfer requests. In this case, the maximum resource for a data transfer request is b_{\max} and is determined by the maximum transfer speed of ST. Let's introduce a vector $\mathbf{b} = (0, b_1, \dots, b_K, b_e, (b_1 + b_e), \dots, (b_K + b_e))$ consisting of $2(K+1)$ components, the first $(K+1)$ components of which correspond to the states ST from $(0,0)$ to $(K,0)$, and the second $(K+1)$ components of the ST states from $(0,1)$ to $(K,1)$. We also denote by $n_{(k,q)}$ the number of ST that are currently in the state (k,q) , and by $\mathbf{n} = (n_{(0,0)}, \dots, n_{(K,0)}, n_{(0,1)}, \dots, n_{(K,1)})$ the vector of the amounts of ST in the considered LA, which are in the corresponding states. The sum of the components \mathbf{n} is equal to the number of ST in LA N . Obviously, the minimum resource required to service all ST in the area in the current state is $l = \mathbf{n}\mathbf{b}^T$, i.e., if the total resource of the LA is v , then incoming requests can be allocated a resource from the remaining part of $v-l$. In this case,

the resource for transmitting data traffic can be increased to b_{\max} if a particular ST is in the state $(0,1)$, and to $(b_{\max} - b_k)$ if the ST is in the state $(k,1)$, $k=1,2,\dots,K$. Note also that the number of requests for the transmission of real-time traffic of the k -th type served in the system is $(n_{(k,0)} + n_{(k,1)})$, $k=1,2,\dots,K$, and the number of requests for data transmission is $\sum_{k=0}^K n_{(k,1)}$.

We will assume that the flows of requests for the transmission of real-time traffic and data are independent, the intervals between the moments of receipt of requests are subject to an exponential distribution. If the ST is not currently busy transmitting real-time traffic, then new requests are received with intensities β_k , $k=1,2,\dots,K$. In essence, this means that the interval until the moment of receipt of a new request for real-time traffic transmission has an exponential distribution with the parameter $\beta = \sum_{k=1}^K \beta_k$, and the probability that this will be a k -type request is β_k/β . Also, if the ST is not currently busy transmitting data traffic, then new requests arise with the intensity of β_e . The request service time is also subject to an exponential distribution with the parameters μ_k , $k=1,2,\dots,K$, and μ_e (μ_e corresponds to the transmission of data traffic at a minimum speed, i.e. when allocating a resource b_e).

The set of network states is written as:

$$S = \left\{ \mathbf{n}: \mathbf{n}\mathbf{b}^T \leq v; n_{(k,q)} \geq 0, k=0,1,\dots,K, q \right. \\ \left. = 0,1; \sum_{k=0}^K \sum_{q=0}^1 n_{(k,q)} = N \right\} \quad (1)$$

The sets of network states for which incoming requests for the transmission of real-time traffic of type k are refused are defined as:

$$U_k = \{ \mathbf{n}: \mathbf{n} \in S, \mathbf{n}\mathbf{b}^T > v - b_k, (n_{(0,0)} + n_{(0,1)}) > 0 \}. \quad (2)$$

In (2), the condition $(n_{(0,0)} + n_{(0,1)}) > 0$ means that there are ST in the network capable of generating requests of type k . The set of network states for which incoming requests for data traffic are refused:

$$U_e = \left\{ \mathbf{n}: \mathbf{n} \in S, \mathbf{n}\mathbf{b}^T > v - b_e, \sum_{k=0}^K n_{(k,0)} > 0 \right\}. \quad (3)$$

Similarly, in (3) the condition $\sum_{k=0}^K n_{(k,0)} > 0$ means that there are ST in the network capable of generating requests for data traffic transmission.

Denote by $p(\mathbf{n})$, $\mathbf{n} \in S$, the probabilities of finding the network in state \mathbf{n} in steady state. Let's assume that state \mathbf{n} , as a result of the occurrence of an event of receipt or completion of service of the request, can be reached from states $\mathbf{n}_{in} \in S_{in}(\mathbf{n})$ with transition intensities $a(\mathbf{n}_{in}, \mathbf{n})$, and from state \mathbf{n} , as a result of the occurrence of an event of receipt or completion of service of the request, it is possible to get to states $\mathbf{n}_{out} \in S_{out}(\mathbf{n})$ with transition intensities $a(\mathbf{n}, \mathbf{n}_{out})$. Then the probabilities $p(\mathbf{n})$ satisfy the SEE:

$$p(\mathbf{n}) \sum_{\mathbf{n}_{out} \in S_{out}(\mathbf{n})} a(\mathbf{n}, \mathbf{n}_{out}) = \sum_{\mathbf{n}_{in} \in S_{in}(\mathbf{n})} p(\mathbf{n}_{in}) a(\mathbf{n}_{in}, \mathbf{n}), \mathbf{n} \in S \quad (4)$$

To solve the SEE, as can be seen from (4), it is necessary to determine the sets $S_{in}(\mathbf{n})$, $S_{out}(\mathbf{n})$, as well as the corresponding $a(\mathbf{n}_{in}, \mathbf{n})$ and $a(\mathbf{n}, \mathbf{n}_{out})$. Let's denote by $\mathbf{e}_{(k,q)}$ a unit vector of dimension of vector \mathbf{n} containing 1 in the position corresponding to the component $n_{(k,q)}$ in vector \mathbf{n} , and zeros in the remaining positions. Any event of receipt or completion of the service of requests in the network corresponds to the difference of two unit vectors. For example, the receipt of a type k request corresponds to the transition of the network from state \mathbf{n} to state $\mathbf{n} - \mathbf{e}_{(0,q)} + \mathbf{e}_{(k,q)}$, i.e. the ST group, in which real-time requests are not serviced, and the service of data transfer is in the q state, is reduced by one ST, and one ST is added to the ST group, in which k -type requests are serviced and the service of data transfer is in the q state. Possible transitions in the network between states, their conditions and intensities are characterized by Table 1, where it is assumed that the network is in state \mathbf{n} .

Table 1

Possible transitions between network states

The event that caused the transition	Transition conditions	
	Changing the state of the ST	Network state change, conditions, transition intensity (coefficients in SEE)
Transitions to state \mathbf{n} (set $S_{in}(\mathbf{n})$)		
Entering state \mathbf{n} when requests are received		
Type k request	$(0, q) \rightarrow (k, q)$, $k = 1, 2, \dots, K$	$\mathbf{n} + \mathbf{e}_{(0,q)} - \mathbf{e}_{(k,q)} \rightarrow \mathbf{n}$, $n_{(k,q)} > 0$, $(n_{(0,q)} + 1)\beta_k$
Request for data transfer	$(k, 0) \rightarrow (k, 1)$, $k = 0, 1, \dots, K$	$\mathbf{n} + \mathbf{e}_{(k,0)} - \mathbf{e}_{(k,1)} \rightarrow \mathbf{n}$, $n_{(k,1)} > 0$, $(n_{(k,0)} + 1)\beta_e$
Entering state \mathbf{n} when the request service is completed		
Type k request	$(k, q) \rightarrow (0, q)$, $k = 1, 2, \dots, K$	$\mathbf{n} - \mathbf{e}_{(0,q)} + \mathbf{e}_{(k,q)} \rightarrow \mathbf{n}$, $\mathbf{n} \in S \setminus U_k$, $n_{(0,q)} > 0$ $(n_{(k,q)} + 1)\mu_k$
Request for data transfer	$(k, 1) \rightarrow (k, 0)$, $k = 0, 1, \dots, K$	$\mathbf{n} - \mathbf{e}_{(k,0)} + \mathbf{e}_{(k,1)} \rightarrow \mathbf{n}$, $\mathbf{n} \in S \setminus U_e$, $n_{(k,0)} > 0$, $(n_{(k,1)} + 1)\mu_e^k$ $(\mathbf{n} - \mathbf{e}_{(k,0)} + \mathbf{e}_{(k,1)})$
Transitions from state \mathbf{n} (set $S_{out}(\mathbf{n})$)		
Exit from state \mathbf{n} when requests are received		
Type k request	$(0, q) \rightarrow (k, q)$, $k = 1, 2, \dots, K$	$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} - \mathbf{e}_{(0,q)} + \mathbf{e}_{(k,q)}$, $\mathbf{n} \in S \setminus U_k$, $n_{(0,q)} > 0$, $n_{(0,q)}\beta_k$
Request for data transfer	$(k, 0) \rightarrow (k, 1)$, $k = 0, 1, \dots, K$	$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} - \mathbf{e}_{(k,0)} + \mathbf{e}_{(k,1)}$, $\mathbf{n} \in S \setminus U_e$, $n_{(k,0)} > 0$, $n_{(k,0)}\beta_e$
Exit from state \mathbf{n} when the request service is completed		
Type k request	$(k, q) \rightarrow (0, q)$, $k = 1, 2, \dots, K$	$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} + \mathbf{e}_{(0,q)} - \mathbf{e}_{(k,q)}$, $n_{(k,q)} > 0$, $n_{(k,q)}\mu_k$
Request for data transfer	$(k, 1) \rightarrow (k, 0)$, $k = 0, 1, \dots, K$	$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} + \mathbf{e}_{(k,0)} - \mathbf{e}_{(k,1)}$, $n_{(k,1)} > 0$, $n_{(k,1)}\mu_e^k(\mathbf{n})$

The table contains the function $\mu_e^k(\mathbf{n})$, which makes sense of the intensity of servicing data transfer requests for ST groups that either served only such requests (case $k = 0$), or simultaneously served requests for real-time traffic transmission of type k with data transfer requests. Let's define $\mu_e^k(\mathbf{n})$. For convenience, we will assume that the numbers of real-time services are numbered in the order of increasing the b_k parameter, i.e. $b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_K$. At the same time, the maximum possible resource for servicing requests for data traffic transmission, when all ST are operating at maximum speed, is obviously $v_{etm} = n_{(0,1)}b_{max} + n_{(1,1)}(b_{max} - b_1) + n_{(2,1)}(b_{max} - b_2) + \dots + n_{(K,1)}(b_{max} - b_K)$. At the same time, in the network at state \mathbf{n} , the resource for servicing data

traffic is $v_{et} = v - l + b_e \sum_{k=0}^K n_{(k,1)}$. There are two possible cases here. If $v_{et} \geq v_{etm}$, then the maximum possible resource can be assigned to each ST, taking into account the requests for real-time traffic transmission, and $\mu_e^0(\mathbf{n}) = \mu_e^{b_{max}/b_e}$, $\mu_e^1(\mathbf{n}) = \mu_e^{(b_{max} - b_1)/b_e}, \dots, \mu_e^K(\mathbf{n}) = \mu_e^{(b_{max} - b_K)/b_e}$.

If $v_{et} < v_{etm}$, then the following procedure is performed:

- 1) Put $L = K$.
- 2) If $\sum_{k=0}^L n_{(k,1)} > 0$, calculate the value of resources for the maintenance of the requests with a uniform distribution between ST $b_{unf} = \left\lfloor \frac{v_{et}}{(\sum_{k=0}^L n_{(k,1)})} \right\rfloor$, otherwise the end of the procedure.
- 3) If $b_{unf} \leq (b_{max} - b_L)$, it is assumed that $\mu_e^1(\mathbf{n}) = \mu_e^2(\mathbf{n}) = \dots = \mu_e^L(\mathbf{n}) = \mu_e b_{unf}/b_e$. The end of the procedure.
- 4) Assign $\mu_e^L(\mathbf{n}) = \mu_e^{(b_{max} - b_L)/b_e}$ and $v_{et} := v_{et} - n_{(L,1)}(b_{max} - b_L)$.
- 5) Put $L = L - 1$ and, if $L \geq 0$, go to step 2), otherwise the end of the procedure.

Note that the rows of Table 1 are taken into account when forming each equation from the SEE several times. For example, the first line, entering state \mathbf{n} when k -type requests are received, can be counted up to $2k$ times, i.e. up to k times for the case $q = 0$ and up to k times for the case $q = 1$. The transition is included in the equation when the condition $n_{(k,q)} > 0$ is met. The second line, entering state \mathbf{n} when data transfer requests are received, can be counted up to $(k+1)$ times, etc.

To solve the SEE, following the approaches developed in [5], we will use the Gauss-Seidel method. The Gauss-Seidel recursion linking the estimation of the non-normalized probabilities of the states of successive (s -th and $(s+1)$ -th) steps of the iterative process, taking into account (4), will have the form:

$$P^{(s+1)}(\mathbf{n}) = \left(\sum_{\mathbf{n}_{in} \in S_{in}(\mathbf{n})} P^{(s,s+1)}(\mathbf{n}_{in}) a(\mathbf{n}_{in}, \mathbf{n}) \right) / \left(\sum_{\mathbf{n}_{out} \in S_{out}(\mathbf{n})} a(\mathbf{n}, \mathbf{n}_{out}) \right), \mathbf{n} \in S \quad (5)$$

Here, estimates of non-normalized probabilities, unlike normalized ones, are indicated by a capital letter P . The upper index corresponds to the step number, and the double index $(s, s+1)$ means that not only the results of calculations of step s are used for evaluation, but also the components of the evaluation vector already calculated at $(s+1)$ step. The convergence of the method is estimated based on the achievement of a small (at the level of $10^{-8} - 10^{-10}$) normalized difference between two successive approximations to the vector of unknown probabilities [5]. The probabilities $p(\mathbf{n})$, $\mathbf{n} \in S$, are obtained by normalization:

$$p(\mathbf{n}) = \frac{P(\mathbf{n})}{N}, N = \sum_{\mathbf{n} \in S} P(\mathbf{n}) \quad (6)$$

The calculated probabilities $p(\mathbf{n})$, $\mathbf{n} \in S$, allow us to obtain the values of quality indicators. Let's start by defining the indicators for a particular LA. It should be noted that the loss of requests in the network can be estimated both from the position of the operator and from the position of the user of communication services [5]. Let's limit ourselves to an assessment from the user's point of view.

Since the input traffic in the considered network depends on its state \mathbf{n} , the proportion of requests for the transmission of traffic of each type lost due to the lack of a free channel resource should be estimated as the ratio of the intensity of the lost requests of the corresponding stream to the intensity of the received requests of this stream [5]. For k -type real-time traffic service requests, we get

$$\pi_k = \frac{\sum_{\mathbf{n} \in U_k} (p(\mathbf{n})(n_{(0,0)} + n_{(0,1)}))}{\sum_{\mathbf{n} \in S} (p(\mathbf{n})(n_{(0,0)} + n_{(0,1)}))}, \quad (7)$$

and for data transfer requests

$$\pi_e = \frac{\sum_{\mathbf{n} \in U_e} (p(\mathbf{n}) \sum_{k=0}^K n_{(k,0)})}{\sum_{\mathbf{n} \in S} (p(\mathbf{n}) \sum_{k=0}^K n_{(k,0)})}, \quad (8)$$

The average service time of a data transfer request is calculated using Little's formula as the ratio of the average number of serviced data requests y_e to the intensity $\lambda_e(1 - \pi_e)$ of the flow of data transfer requests accepted for service, and is equal to:

$$\begin{aligned} W &= \frac{y_e}{\lambda_e(1 - \pi_e)} \\ y_e &= \sum_{\mathbf{n} \in S} (p(\mathbf{n}) \sum_{k=0}^K n_{(k,1)}) \\ \lambda_e &= \beta_e \sum_{\mathbf{n} \in S} (p(\mathbf{n}) \sum_{k=0}^K n_{(k,0)}). \end{aligned} \quad (9)$$

Since in the network under consideration, ST are located in several LA with numbers $m=1,2,\dots,M$, then the quality indicators should be calculated as weighted averages on a set of LA. Belonging to a particular LA will be indicated by the upper index m . The average service time of a data transfer request in the W_c network is determined by the ratio:

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{1}{\lambda_{ce}} \sum_{m=1}^M \lambda_e^m (1 - \pi_e^m) W^m, \\ \lambda_{ce} &= \sum_{m=1}^M \lambda_e^m (1 - \pi_e^m). \end{aligned} \quad (10)$$

Taking into account (9), we obtain

$$W_c = \frac{\sum_{m=1}^M y_e^m}{\lambda_{ce}}. \quad (11)$$

3 Characteristics of the tasks that can be solved using the developed model

The developed model can be used to determine the minimum required resource and solutions for its distribution between LA in multiservice networks of low-power ST based on HTS. The initial data for solving the tasks are:

- the number of ST in each LA N^m , $m = 1, 2, \dots, M$;
- the maximum transfer speed of ST in units of resource b_{max} ;
- a list of real-time services, their characteristics (b_k, μ_k) , $k = 1, 2, \dots, K$;
- characteristics of elastic data traffic (b_e, μ_e) ;
- requirements for the quality of service provision $(\pi_k \leq \pi_k^*, k = 1, 2, \dots, K, \pi_e \leq \pi_e^* \text{ и } W^m \leq W^*, m = 1, 2, \dots, M)$;

– the intensity of occurrence of requests for each type of β_k , $k = 1, 2, \dots, K$ and β_e at ST.

Note that for given ST characteristics, the quality indicators for individual LA π_k^m , $k = 1, 2, \dots, K$, π_e^m , W^m , as well as λ_e^m and y_e^m , $m = 1, 2, \dots, M$, are functions of the number of ST N^m and the allocated LA resource v^m , $m = 1, 2, \dots, M$. This allows you to use two-step procedures to solve tasks. At the first step, the dependencies π_k^m , π_e^m , W^m , λ_e^m and y_e^m are obtained from the possible values of v^m for given N^m , $m = 1, 2, \dots, M$, and at the second step, on the basis of these dependencies, preferred solutions for the network as a whole are found.

The task of minimizing the required resource has the form:

$$\begin{aligned} v &= \sum_{m=1}^M v^m \rightarrow \min, \\ \pi_k^m(v^m, N^m) &\leq \pi_k^*, m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K, \\ \pi_e^m(v^m, N^m) &\leq \pi_e^*, W^m(v^m, N^m) \leq W^*, \\ m &= 1, 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (12)$$

Obviously, the total resource will be minimal if the minimum resources provided by each LA. Therefore, to solve the task, first for each LA ($m = 1, 2, \dots, M$) using the dependencies $\pi_k^m(v^m, N^m)$, $\pi_e^m(v^m, N^m)$, $W^m(v^m, N^m)$ it is necessary to find the minimum resource values v_k^m , v_e^m and v_w^m , that satisfy the corresponding constraints (12). Then v^m is obtained in the form $v^m = \max(v_k^m, v_e^m, v_w^m)$, and $v = \sum_{m=1}^M v^m$.

We will consider the task of finding the preferred distribution of resource v between LA in two formulations. The first one provides for minimizing the average service time of a data transfer request in the network W_c and, taking into account (10) and (11), has the form:

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{\sum_{m=1}^M y_e^m(v^m, N^m)}{\sum_{m=1}^M \lambda_e^m(v^m, N^m)(1 - \pi_e^m(v^m, N^m))} \rightarrow \min, \\ \sum_{m=1}^M v^m &= v, \\ \pi_k^m(v^m, N^m) &\leq \pi_k^*, m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K, \\ \pi_e^m(v^m, N^m) &\leq \pi_e^*, W^m(v^m, N^m) \leq W^*, \\ m &= 1, 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (13)$$

The second formulation proceeds from the fact that ST of all LA should have equal opportunities for data transmission, and, accordingly, the maximum average service time of a data transfer request on a set of LA is subject to minimization:

$$\begin{aligned} \max_{m \in \{1, M\}} &\left(\frac{y_e^m(v^m, N^m)}{\lambda_e^m(v^m, N^m)(1 - \pi_e^m(v^m, N^m))} \right) \rightarrow \min, \\ \sum_{m=1}^M v^m &= v, \\ \pi_k^m(v^m, N^m) &\leq \pi_k^*, m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K, \\ \pi_e^m(v^m, N^m) &\leq \pi_e^*, W^m(v^m, N^m) \leq W^*, \\ m &= 1, 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (14)$$

When solving tasks in both formulations, you should first find the minimum resources of the LA v_{min}^m , $m = 1, 2, \dots, M$, ensuring the fulfillment of restrictions on the limit values of quality

indicators. In fact, the resource $v_p = v - \sum_{m=1}^M v_{min}^m$ is subject to distribution between LA.

Since the solutions of SEE and the values of quality indicators can only be obtained numerically, a direct search seems natural to solve tasks. Obviously, the number of variants is equal to the number of combinations from $(v_p + M - 1)$ to $(M - 1)$, i.e. $C_{v_p+M-1}^{M-1}$. Direct search can be used when v_p and M are small. For example, if the ST are located in seven LA, and the volume of the unallocated resource is 30-40 units, then it is necessary to calculate about 2-10 million variants. If the dependencies of quality indicators and parameters for individual LA are calculated in advance in the form of tables, then such a search is not difficult for a personal computer.

If the intensity of the flow of requests of each type can be approximately considered constant (as in the Erlang model), and the loss of data transmission costs is negligible, the dynamic programming method can be used to solve the task in the first formulation [12] by analogy with how it is done in [11].

Regarding the solution of the task in the second formulation, it is necessary to note that the dependencies of the average service time of the request for data transfer on the resource for each LA are non-increasing (see an example of such dependencies in Figure 4). In these conditions, the resource should be distributed step by step, sending the next unit to the LA, where the current achieved average service time is maximum.

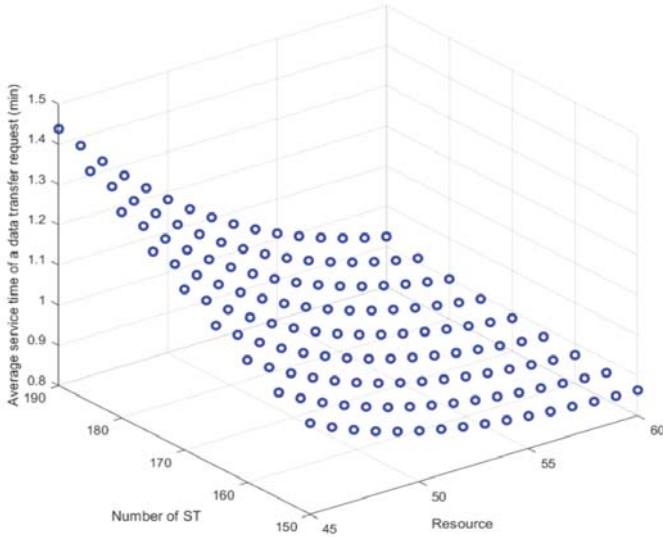


Fig. 4. Example of the dependencies of the average service time of a data transfer request on a resource allocated to the LA for a different number of ST

Taking into account the above circumstances, the generalized schemes for solving tasks (12), (13) and (14) include the following steps:

1) Construction for each LA of the dependencies $\pi_k^m (k = 1, 2, \dots, K)$, π_e^m , W^m , λ_e^m and y_e^m on the possible values of v^m for given $N^m, m = 1, 2, \dots, M$. Finding the minimum values of v_{min}^m from them, ensuring the fulfillment of the constraints of the corresponding tasks (12), (13) or (14), as well as the value of the distributed resource v_p for tasks (13) and (14). The vector $(v_{min}^1, v_{min}^2, \dots, v_{min}^M)$ is the solution to task (12). And for tasks (13) and (14), the upper bounds of the LA resource values for dependencies are expanded to $v_{min}^m + v_p$.

2) Acceptance of minimum values for tasks (13) and (14) as initial resource values ($v^m = v_{min}^m, m = 1, 2, \dots, M$).

3) When solving the task (14) performing v_p steps, including:
 – determination of the number of LA with a maximum value $W^m(v^m, N^m)$, i.e. $m = \operatorname{argmax}_{m \in [1, M]} W^m(v^m, N^m)$ where

$W^m(v^m, N^m)$ is calculated according to (14);

– allocation of the resource unit of the m -th LA ($v^m := v^m + 1$).

4) When solving task (13), the following steps are performed:
 – generation of a set of variants $G(M, v_p)$ for allocating an additional resource v_p to an existing set of M LA. The generation is carried out step by step. Obviously, $G(M, 1)$ includes M variants (the resource unit is transferred to one of the M LA). $G(M, i)$ is obtained from $G(M, i - 1)$ by adding to each variant from $G(M, i - 1)$ a unit of resource in one of the LA (M variants) and filtering out the matching variants;

– calculation of the objective function of the task (13) for each variant of $G(M, v_p)$ and determination of the variant providing a minimum of W_c .

4 Numerical examples of the use of model

As an example, consider the case of placing ST in three LA, with $N^1 = 50, N^2 = 100$ and $N^3 = 150$. Maximum transfer rate ST in resource units $b_{max} = 8$. Two real-time services with parameters are available to drivers: $b_1 = 1, b_2 = 4, \mu_1 = 0,3 \text{ min}^{-1}, \mu_2 = 0,15 \text{ min}^{-1}$, as well as elastic traffic transmission services with parameters $b_e = 2, \mu_e = 0,3 \text{ min}^{-1}$. The intensity of occurrence at each ST of requests for real-time traffic $\beta_1 = 0,03 \text{ min}^{-1}, \beta_2 = 0,002 \text{ min}^{-1}$, and for elastic data traffic $\beta_e = 0,01 \text{ min}^{-1}$. Let the quality-of-service requirements be set in the form $\pi_1 = \pi_2 = \pi_e \leq 0,01$.

In accordance with the task solving scheme described in the third section, the dependencies of the service parameters for each LA on the allocated resource are first obtained. Figure 5 shows the dependencies for the second real-time service $\pi_2^1(v^1), \pi_2^2(v^2)$ and $\pi_2^3(v^3)$, since this service requires maximum resource costs to service requests. The dependencies $W^1(v^1), W^2(v^2)$ and $W^3(v^3)$ are shown in Figure 6.

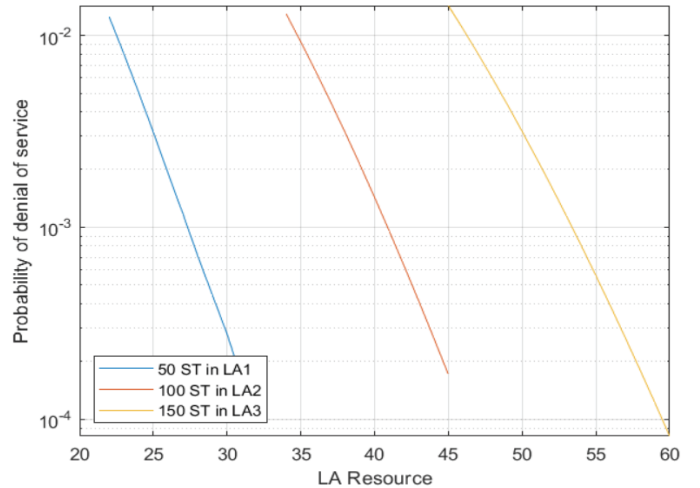


Fig. 5. Dependence of the probabilities of denial of service for requests of the second real-time service on the amount of resource allocated to the LA

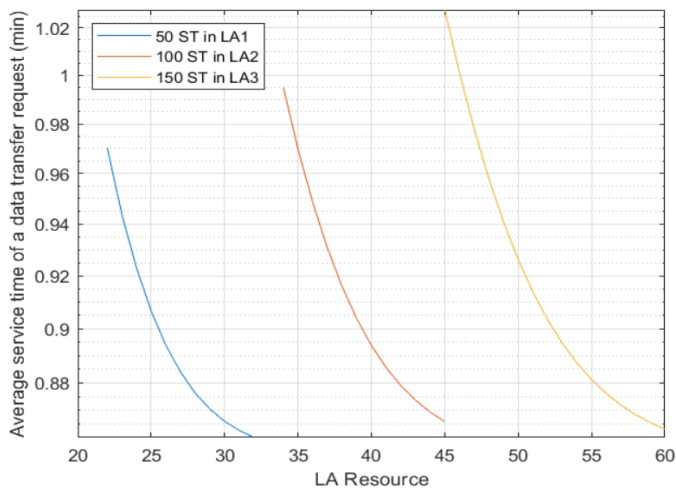


Fig. 6. Dependence of the average service time (in minutes) of requests for the transmission of elastic data traffic (ET) on the volume of the resource allocated to the LA

Figure 6 shows that the minimum LA resources are $v_{\min}^1 = 23$, $v_{\min}^2 = 35$ и $v_{\min}^3 = 47$. Therefore, the minimum network resource is 105.

Suppose that during operation the network resource is 115 units, i.e. $v_p = 10$. Solving the task in formulation (14), we obtain:

- minimum average time 0,91392 min.;
- L resources $v^1 = 25$, $v^2 = 39$ and $v^3 = 51$.

To solve the task in formulation (13), a set of variants has been formed with a total number of $C_{12}^2 = 66$. Comparing the variants gives the result:

- minimum average time is 0,90591 min.;
- L resources $v^1 = 23$, $v^2 = 39$ and $v^3 = 53$.

The difference in the results can be explained by the fact that in order to minimize the average time for servicing requests for data traffic transmission over the network, it is preferable to invest the resource in the third LA, from where the main part of the request flow comes, allowing some increase in the average time for the first LA, from where the flow is minimal.

5 Conclusion

For networks of low-power subscriber terminals based on HTS, a model of joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic has been built, taking into account the uneven placement of terminals in local areas, a limited number of terminals, the possibility of simultaneous servicing by each terminal of requests for traffic transmission of two types, one of them which is elastic data traffic, another real-time traffic, with a limit on the speed of information transfer by the terminal. When constructing the model, the apparatus of multidimensional stepwise Markov processes and the Gauss-Seidel method were used to find the probabilities of network states in steady-state mode. Using the model, both the tasks of determining the minimum required network resource to meet the specified quality requirements can be solved, as well as the tasks of finding preferred resource distributions between local areas according to the criterion of minimizing the average service time for data transfer requests. The results obtained make it possible to use the model in planning and managing the operation of networks based on spacecraft with high throughput.

References

1. Yu. Urlichich, S. Prokhorov, "Celi i zadachi programmy` "Sfera"," *Sbornik statej "Sputnikovaya svyaz` i veshhanie – 2020"*. Moscow: Grotek, 2020, pp. 26-32.
2. Yu. M. Urlichich, "Perspektivny`e tehnologii i servisy` sputnikovoj svyazi," *SATCOMRUS 2022*.
3. .S. Aleshin, S.G. Dogaev, "Ocenka real`ny`x potrebnostej Rossii v uslugax podvizhnoj sputnikovoj svyazi," *E`lektrsvyaz`*. 2021. No. 2, pp. 48-51.
4. V.S. Aleshin, "Ocenka realizuemosti aktivnoj fazirovannoj antennoj reshyotki terminala sistemy` sputnikovoj svyazi "E`kspress-RV"," *T-Comm*. 2021. Vol 15. No. 8, pp. 13-21.
5. S.N. Stepanov, "Teoriya teletrafika: koncepcii, modeli, prilozheniya," Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 868 p.
6. M.S. Stepanov, M.G. Kanishcheva, E.E. Malikova, J. Ndayikunda, N.G. Kaigorodov, "The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744351.
7. M.S. Stepanov, S.N. Stepanov, F.S. Kroshin, "Effective Algorithm of Estimation the Performance Measures of Group of Servers with Dependence of Call Repetition on the Type of Call Blocking DCCN 2022," *Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham*. 2022.
8. Elena E. Gibadullina, Elena V. Viskova, Sergey N. Stepanov, "Automated Service Configuration Management in IP/MPLS Networks," *4th International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies - 2022"*, *MoNeTec*. DOI 10.1109/MoNeTec55448.2022.9960765
9. U.M. Andrabi, M.V. Kanishcheva, S.N. Stepanov, "Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows," *T-Comm*, 2022. Vol. 16. No.8, pp. 54-62. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-8-54-62.
10. T. Dawood, M.S. Stepanov, C. Naoussi, B. Joao, K. Yahia, "The Mathematical Model of the Internet of Things Traffic Servicing in Case of its Impulse Nature," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2023, pp. 1-8, DOI: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092064.
11. F. Ndimumahoro, M.S. Stepanov, A.R. Muzata, D. Tammam, V.G. Popov, "Using the Principles of Mobile Systems Modeling for LoRaWAN Characteristics Estimation," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-8, DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744363.
12. M.S. Stepanov, S.N. Stepanov, U. Andrabi, D. Petrov, J. Ndayikunda, "The Increasing of Resource Sharing Efficiency in Network Slicing Implementation," In: Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) *Distributed Computing and Computer Networks. DCCN 2021. Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham*. 2022. Vol. 1552, pp. 18-35. doi: 10.1007/978-3-030-97110-6_2.
13. A.O. Volkov, A.V. Korobkina, S.N. Stepanov, "Development of a Model and Algorithms for Servicing Real-Time and Data Traffic in a Cloud Computing System," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744289.
14. Mikhail Stepanov, Faurdoir Ndimumahoro, Tammam Dawood, Benedito Mutumba, Joao Alberto, Christian Naoussi, "The Construction and Analysis of the LTE Network Model with Joint Service of Traffic of LTE and NB-IoT Devices," *4th International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies - 2022"*, *MoNeTec – 2022*.
15. Umer Mukhtar Andrabi, M.S. Stepanov, "Collective servicing of heterogenous traffic streams over 3GPP LTE network and application of access control," *T-Comm*, 2022, vol. 16, no.3, pp. 43-49. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-43-49
16. M.S. Stepanov, S.N. Stepanov, M.G. Kanischeva, F.S. Kroshin, "Analysis of Procedures for Joint Servicing of Multiservice Traffic in Access Nodes. DCCN 2023," *Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham*. 2023, pp. 1-15.

17. S.N. Stepanov, V.I. Korotkova, M.G. Kanischeva, A.P. Pshenichnikov, "Construction and Analysis of a Model of Group Receipt of IoT Elastic Data in a Wireless Access Node," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, SOSG 2023 pp. 1-8, 2023 doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091982

18. M. Andrabi, S.N. Stepanov, "The Model of Conjoint Servicing of Real-Time Traffic of Surveillance Cameras and Elastic Traffic Devices with Access Control," *2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*. Ankara, Turkey, 2021, pp. 1-6.

19. S.N. Stepanov, U.M. Andrabi, M.S. Stepanov, J. Ndayikunda, "Reservation Based Joint Servicing of Real Time and Batched Traffic in Inter Satellite Link," *Proc. of 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5.

20. S.N. Stepanov, A.I. Romanov, M.S. Stepanov, A.P. Vasilyev, "Analytical modeling of call admission control for real-time and elastic services in inter satellite link," *2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2018. P. 8350637.

21. S.V. Makov, A.A. Maslov, G.V. Sebekin, "Ocenka e'ffektivnosti ispol'zovaniya resursa propusknoj sposobnosti kanalov retranslyacii kosmicheskix apparatov klassa HTS na geostacionarnoj i vy'sokoe'llipticheskoj orbite dlya organizacii seti peredachi trex tipov trafika," *Nano-industriya*. Vol. 16(119), 2023, pp. 613-619.

22. Hedmi A. Taxa, "Vvedenie v issledovanie operacij," Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2005. 912 p.

23. A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, S. Dymkova, O. Varlamov, "Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems," *Technologies*, vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110.

МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ СОВМЕСТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ И ЭЛАСТИЧНОГО ТРАФИКА ДАННЫХ В СЕТИ МАЛОМОЩНЫХ МОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ НА БАЗЕ КА С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Маслов Александр Александрович, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, maslov.aa@mipt.ru

Себекин Геннадий Валерьевич, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, sebekin.gv@mipt.ru

Степанов Сергей Николаевич, Московский технический университет связи и информатики; Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), Москва, Россия, s.n.stepanov@mtuci.ru

Щурков Алексей Олегович, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, shchurkov.ao@mipt.ru

Васильев Александр Проталионович, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Аннотация

Для реализации функций планирования и распределения канального ресурса в сетях маломощных мобильных абонентских терминалов на базе космических аппаратов с высокой пропускной способностью на геостационарной и высокоэллиптических орбитах требуется разработка моделей процессов совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных. Модели должны учитывать неравномерность размещения терминалов по локальным зонам, ограниченное их количество, возможность одновременного обслуживания каждым терминалом заявок на передачу трафика двух типов, один из которых является эластичным трафиком данных, другой трафиком реального времени, при ограничении на скорость передачи информации терминалом. Цель работы состоит в решении задачи моделирования с учетом перечисленных факторов. Построены модели на основе многомерных ступенчатых марковских процессов. Определен перечень задач, которые могут решаться с их использованием, включающий как задачи определения минимально необходимого ресурса сети для выполнения заданных требований по качеству, так и задачи отыскания предпочтительных распределений ресурса между локальными зонами по критерию минимизации среднего времени обслуживания заявок на передачу данных. Представлены численные примеры решения каждой задачи. Разработанные модели могут быть использованы для построения систем управления сетью передачи информации на базе космических аппаратов с высокой пропускной способностью.

Ключевые слова: космические аппараты с высокой пропускной способностью, канальный ресурс, мультисервисный трафик, трафик реального времени, эластичный трафик, мобильные абонентские терминалы.

Литература

1. Урличич Ю., Прохоров С. Цели и задачи программы "Сфера" // Сборник статей "Спутниковая связь и вещание - 2020". М.: Гротек, 2020. С. 26-32.
2. Урличич Ю.М. Перспективные технологии и сервисы спутниковой связи // XXVII Международная конференция операторов и пользователей сети спутниковой связи и вещания в Российской Федерации SATCOMRUS 2022.
3. Алешин В.С., Догаев С.Г. Оценка реальных потребностей России в услугах подвижной спутниковой связи // Электросвязь. 2021. № 2. С. 48-51.
4. Алешин В.С. Оценка реализуемости активной фазированной антенной решётки терминала системы спутниковой связи "Экспресс-РВ" // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №8. С. 13-21.
5. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 868 с.
6. Stepanov M.S., Kanishcheva M.G., Malikova E.E., Ndayikunda J., Kaigorodov N.G. The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744351.
7. Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kroshin F.S. Effective Algorithm of Estimation the Performance Measures of Group of Servers with Dependence of Call Repetition on the Type of Call Blocking DCCN 2022 // Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham. 2022.
8. Gibadullina Elena E., Viskova Elena V., Stepanov Sergey N. Automated Service Configuration Management in IP/MPLS Networks // 4th International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies - 2022", MoNeTec - 2022. DOI 10.1109/MoNeTec55448.2022.9960765
9. Andrabi U.M., Kanishcheva M., Stepanov S.N. Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. Vol. 16, no.8, pp. 54-62. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-8-54-62.
10. Dawood T., Stepanov M. S., Naoussi C., Joao B., Yahia K. The Mathematical Model of the Internet of Things Traffic Servicing in Case of its Impulse Nature // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-8, DOI: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092064.
11. Ndimumahoro F., Stepanov M.S., Muzata A.R., Tammam D., Popov V.G. Using the Principles of Mobile Systems Modeling for LoRaWAN Characteristics Estimation // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-8, DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744363.
12. Stepanov M.S., Stepanov S.N., Andrabi U., Petrov D., Ndayikunda J. The Increasing of Resource Sharing Efficiency in Network Slicing Implementation. In: Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozlyev D. (eds) Distributed Computing and Computer Networks. DCCN 2021. Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham. 2022. Vol. 1552, pp. 18-35. doi: 10.1007/978-3-030-97110-6_2
13. Volkov A.O., Korobkina A.V., Stepanov S.N. Development of a Model and Algorithms for Servicing Real-Time and Data Traffic in a Cloud Computing System // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-6, DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744289.
14. Stepanov Mikhail, Ndimumahoro Faurdoir, Dawood Tammam, Mutumba Benedito, Alberto Joao, Naoussi Christian. The Construction and Analysis of the LTE Network Model with Joint Service of Traffic of LTE and NB-IoT Devices // 4th International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies - 2022", MoNeTec - 2022.
15. Umer Mukhtar Andrabi, Stepanov M.S. Collective servicing of heterogeneous traffic streams over 3GPP LTE network and application of access control. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. Vol. 16, no.3, pp. 43-49. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-43-49
16. Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kanishcheva M.G., Kroshin F.S. Analysis of Procedures for Joint Servicing of Multiservice Traffic in Access Nodes. DCCN 2023. Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham. 2023, pp. 1-15.
17. Stepanov S.N., Korotkova V.I., Kanishcheva M.G., Pshenichnikov A.P. Construction and Analysis of a Model of Group Receipt of IoT Elastic Data in a Wireless Access Node // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2023 pp. 1-8: Conference Proceedings, 2023 doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091982
18. Andrabi U.M., Stepanov S.N. The Model of Conjoint Servicing of Real-Time Traffic of Surveillance Cameras and Elastic Traffic Devices with Access Control // 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC). Ankara, Turkey, 2021, pp. 1-6.
19. Stepanov S.N., Andrabi U.M., Stepanov M.S., Ndayikunda J. Reservation Based Joint Servicing of Real Time and Batched Traffic in Inter Satellite Link // Proc. of 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5.
20. Stepanov S.N., Romanov A.I., Stepanov M.S., Vasilyev A.P. Analytical modeling of call admission control for real-time and elastic services in inter satellite link // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2018. P. 8350637.
21. Маков С.В., Маслов А.А., Себекин Г.В. Оценка эффективности использования ресурса пропускной способности каналов ретрансляции космических аппаратов класса HTS на геостационарной и высокоэллиптической орбите для организации сети передачи трех типов трафика // Наноиндустрия. Специальный выпуск 9s, Том 16(119), 2023. С. 613-619.
22. Таха Хедми А. Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. 912 с.
23. Pastukh A., Tikhvinskiy V., Dymkova S., Varlamov O. Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems // Technologies. Vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110.

ALGORITHM FOR ANALYZING THE AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM DATA TO IDENTIFY TYPICAL SCENARIOS FOR VESSEL DIVERGENCE AND TESTING THE SYSTEMS OF AUTONOMOUS SHIPPING

Sergey V. Smolentsev,

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg Russia, SmolencevSV@gumrf.ru

Artem A. Butsanets,

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg Russia, butsanetsaa@gumrf.ru

Sergei F. Shakhnov,

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg Russia, shahnovsf@gumrf.ru

Anatoliy P. Nyrkov,

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg Russia, kaf_koib@gumrf.ru

Evgeniy O. Ol'khovik,

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg Russia, olhovikeo@gumrf.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59

Manuscript received 28 January 2024;

Accepted 26 February 2024

Keywords: maritime autonomous surface ship, MASS, system of autonomous shipping, navigation safety, automatic identification system, navigation situation analysis, vessels divergence, data analysis method

The problem of analyzing data from the automatic identification system (AIS) in order to highlight typical situations where vessels meet at sea and identify the actions of navigators to diverge in these situations is discussed in the paper. This problem has become relevant recently due to the need to have a base of reference actions for testing the systems of autonomous shipping (SAS), the interest in the development of which has recently only increased in connection with the creation of maritime autonomous surface ships (MASS). The AIS data analysis algorithm consists of preliminary stage of data filtering and two main stages. At the preliminary stage, data containing errors that significantly complicate subsequent analysis and are associated with incorrect information are excluded. It has been revealed that such data can constitute up to 10% of the total information. Further, at the first stage of filtering, the vessels whose navigation status does not imply movement or their speed is less than 3 knots are eliminated. At the first stage of filtering, the number of records on navigation status per day reduces from 1.5-2 million to 0.4-0.5 million. The second stage of filtering is the analysis of typical interaction of vessels

under the crew control in various conditions and situations. The task of this filtering stage is to select groups of vessels according to the following criteria: timestamp and location of the vessel; the latter must correspond to a given range for the estimated distance between vessels, which is selected from a number of pre-determined options. Thus, as a result of filtering, three typical scenarios are selected. The first scenario is vessels movement on parallel courses without and with interaction. The second scenario is vessels movement on reciprocal courses without and with interaction. The third scenario is vessels movement on crossing courses without and with interaction. During the analysis of typical scenarios and to develop an approach for testing the SAS of MASS using archival AIS data, nine typical situations of vessels interaction during a dangerous convergence are considered and described. The approach to testing SAS IANS proposed in this work includes assessment of time it takes to complete a given route, deviation from the route and speed mode, comparison of completed maneuvers and the MASS interaction with other vessels.

Information about authors:

Sergey V. Smolentsev, Dr. of Technical Sciences, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Artem A. Butsanets, Ph.D., Head of the Department of Scientific and Technical Information and Intellectual Property, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Sergei F. Shakhnov, Dr. of Technical Sciences, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, professor of Navigation on Inland Waterways Department, St. Petersburg, Russia

Anatoliy P. Nyrkov, Dr. of Technical Sciences, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Evgeniy O. Ol'khovik, Dr. of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Scientific and Innovation Activities, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Для цитирования:

Смоленцев С.В., Буцавец А.А., Шахнов С.Ф., Нырко А.П., Ольховик Е.О. Алгоритм анализа данных автоматической идентификационной системы для выделения типовых сценариев расхождения судов и тестирования систем автономного судовождения // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 50-59.

For citation:

Smolentsev S.V., Butsanets A.A., Shakhnov S.F., Nyrkov A.P., Ol'khovik E.O. (2024). Algorithm for analyzing the automatic identification system data to identify typical scenarios for vessel divergence and testing the systems of autonomous shipping. T-Comm, vol. 18, no.3, pp. 50-59.

Introduction

Navigation safety is a key issue in global shipping. This issue is especially acute when designing and creating unmanned vessels. An important component of this issue is the problem of safe divergence of vessels at sea. To solve it, first of all, it is necessary to analyze situations of dangerous convergence of vessels in a real navigation situation. This will allow you to highlight the maneuvers that navigators undertake to avoid collision in various navigation situations. To analyze such situations, it is necessary, first of all, to obtain a sufficiently large amount of data. One of the sources of information about situations of possible collisions can be an automatic identification system (hereinafter referred to as AIS). Analyzing this information can allow researchers to identify situations of dangerous convergence and actions to diverge in these situations.

The AIS, used in shipping, is designed to identify vessels, their location, movement parameters and other data using radio communication protocols [1,2,3] in the VHF band (161.975 MHz and 162.025 MHz). In accordance with the SOLAS 74/88 Convention, the AIS is mandatory for vessels of over 300 m³ gross tonnage engaged in international voyages, vessels of 500 m³ gross tonnage or more (not engaged in international voyages) and all passenger vessels. Smaller displacement vessels and yachts may be equipped with a Class B AIS receiver. The AIS system is used to identify other vessels, avoid possible collisions, and also as input data for vessel tracking management systems (hereinafter referred to as VTMS)

With the advent of autonomous surface vessels, ensuring the navigation safety of maritime autonomous surface ships (hereinafter referred to as MASS) has become an urgent task. The concept of the autonomous shipping functioning involves the implementation of two main segments - autonomous vessels and remote control centers for these vessels, which are usually located on the shore [4]. Their cumulative operation is ensured by specially developed software and hardware, which in this work are called systems of autonomous shipping (hereinafter referred to as SAS). The desire to improve navigation safety has led to the development of several theoretical and practical approaches to achieve higher level of safety and efficiency in maritime navigation using AIS data. Despite the wide range of research methods in this area [5-10], few studies examine real-world AIS data in a generalizable context [5-7] and a small number of studies bases their analysis on well-defined parameters [8-10].

In this paper, it is proposed to use AIS data to analyze the vessels movement under a crew control, in order to compare possible options when operating vessel by the SAS. The objectives of the work are to develop an algorithm for processing and filtering data from AIS, as well as to develop an approach for testing SAS of MASS using archived AIS data.

Methods and materials

The set of data transmitted via AIS channels and the structure of their messages is standardized and described in detail in [1,2,3], and therefore is not presented in this work. AIS messages have two types - metadata about the vessel and data about its movement. In general, from AIS messages we will select only the necessary information for subsequent analysis, namely:

MMSI	- Maritime Mobile Service Identity, nine-digit individual number assigned to the vessel
IMO	- Unique identifier of the vessel in accordance with the RESOLUTION A.600(15) – IMO SHIP IDENTIFICATION NUMBER SCHEME
shipType	- Vessel type
navStat	- Vessel navigation status
coordinates	- Vessel coordinates, WGS-84
SOG	- Speed over the ground
COG	- Course over the ground
ROT	- Rate of turn
HEADING	- Gyrocompass heading
timestamp	- Time, UTC

In [11], the authors had proposed the use of archived AIS data to determine the safe speed of autonomous vessels in various navigation situations. The sources of archival and current AIS data for the Baltic Sea are the following services – [12-13]. The archives contain information on vessels movement from 2006 to the present day; operational data is received (upon request) with a delay of several minutes. Since most of the archival data is anonymized and contains limited sets of information, the collection of operational AIS data was organized. For this purpose, special software was developed in Python programming language in the Jupyter Notebook environment. It requests a set of AIS data from a web service with a period of 1 minute and saves them into a database for further analysis. The time period was chosen from July 1 to September 30, 2022, since the specified time refers to the most intense shipping in the Baltic Sea.

Results and their discussion

AIS data processing algorithm

The proposed algorithm for processing AIS data allows us to identify various navigation situations and determine the actions of navigators in real situations of dangerous convergence. A schematic flowchart of the AIS data processing algorithm is presented in Figure 1.

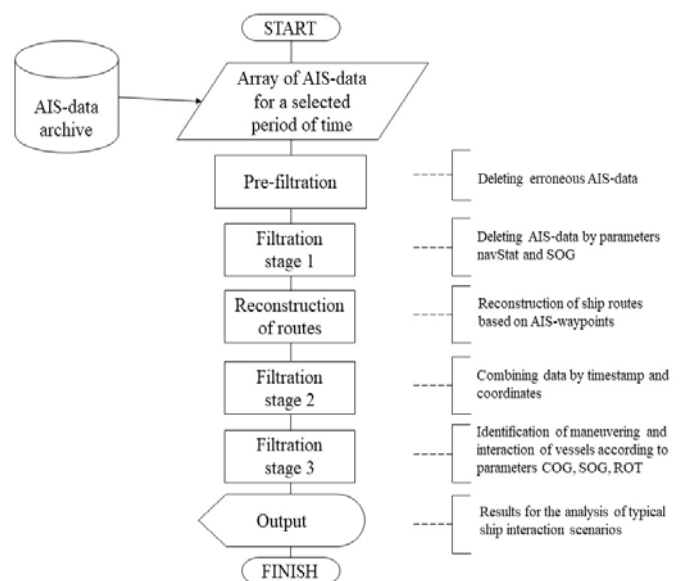


Fig. 1. Schematic flowchart of the AIS data processing algorithm

Preliminary filtering of AIS data (error elimination)

The number of vessels positions according to AIS data for analysis within one day ranges from 1.5 to 2 million (Fig. 2). However, some of the data contains errors that significantly complicate subsequent analysis. These errors are associated with incorrect information and the location of vessels, timestamps, data repetition, incorrect vessel identification, the presence of virtual aids to navigation, etc. Such data can constitute up to 10% of the total array; in this work, they were subjected to forced filtering.

Algorithms for such filtering are quite well known and partially disclosed in [5-10] and are implemented directly by filtering inside the database using the SQL query language.

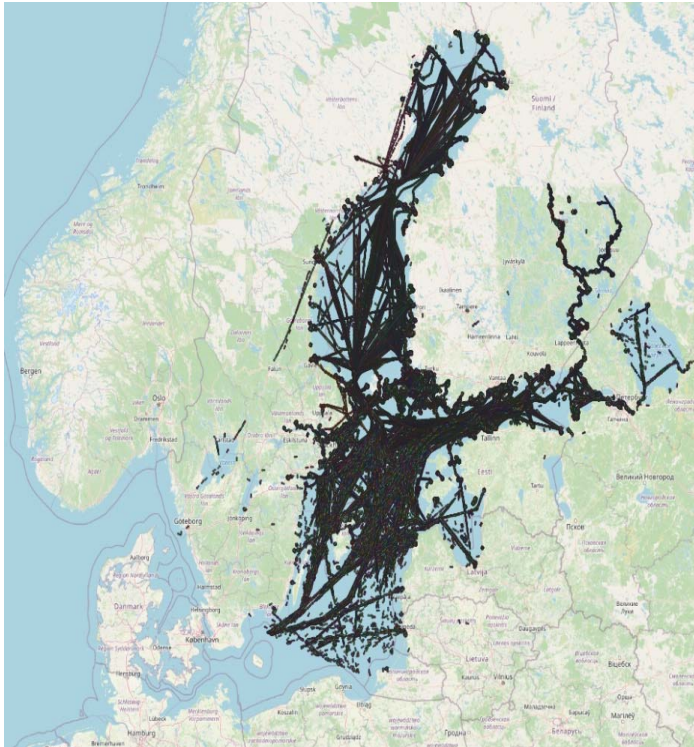


Fig. 2. Vessels positions in the Baltic Sea for 1 day (Sep. 2022)

The first stage of filtering AIS data

Since a complete array of AIS data is not required to analyze the movement, behavior and interaction of vessels with each other, a filtering stage, which consisted of excluding vessels whose navigation status (AIS parameter - navStat) does not imply movement, i.e. riddled at anchor, moored at the pier, participating in fishing, etc., is performed. Additionally, the vessels whose speed is less than 3 knots are excluded. After this filtering stage, the amount of relevant AIS data for subsequent analysis is reduced to 0.4–0.5 million positions per day.

Building vessels movement routes based on AIS data

At the next stage, using AIS data for each identified vessel, a route is built using waypoints (AIS parameter – coordinates) in automatic mode. An example of the constructed routes is presented in Figure 3. These calculations are necessary to identify areas in the Baltic Sea water area where ship routes intersect.

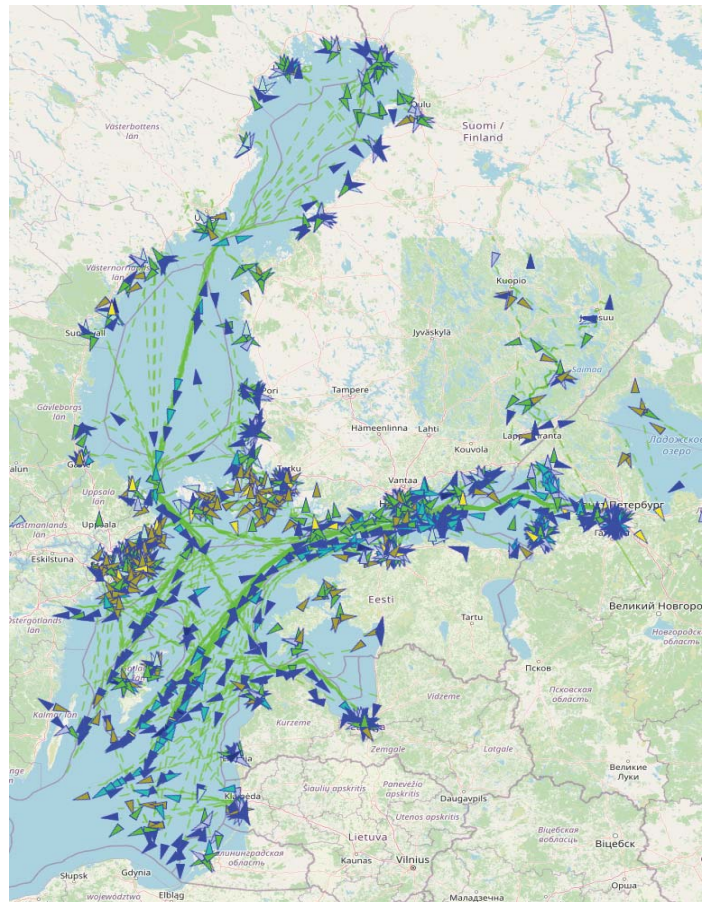


Fig. 3. Vessels movement routes in the Baltic Sea for 1 day (green lines, September 2022)

The second stage of filtering AIS data

Since this work requires an analysis of the typical interaction of vessels in various conditions and situations under the crew control, the task of this filtering stage is to select such vessels (groups of vessels) according to the following criteria: timestamp (AIS parameter – timestamp), which must correspond to a specified time range (for example, 5÷10 minutes); the vessel location (AIS parameter – coordinates), which must also correspond to a given range for the estimated distance between vessels, which is selected from among the options under consideration:

- 3÷6 miles;
- 1÷2 miles;
- The distance corresponding to the stopping distance of the selected vessel (for example, selected from the vessel maneuvering characteristics booklet);
- Estimated zone of a possible collision between two vessels, as a parameter R, determined from the linear dimensions (length, width) of the vessels, positioning accuracy and probable deviation of the vessel course in the local coordinate system of each vessel and calculated as:

$$R = (L_1 + L_2) \times (1 + k_1) + (W_1 + W_2)/k_2 + P$$

where:

- R – Estimated collision zone
- L_1 – length of vessel No. 1
- L_2 – length of vessel No. 2
- W_1 – width of vessel No. 1
- W_2 – width of vessel No. 2
- k_1 – calculated coefficient = $\sin(\beta)$; $\beta \approx 5 \div 8^\circ$; $\sin(6^\circ) = 0.105$
- k_2 – calculated coefficient = $\cos(\beta)$; $\beta \approx 5 \div 8^\circ$; $\cos(6^\circ) = 0.995$
- p – vessel position accuracy $\approx 20m$, or parameter "accuracy AIS"

A similar approach was proposed by the authors in [14-16] with some changes or additions; the coefficients k_1 and k_2 are determined based on the maneuvering characteristics of the vessel or by the method of statistical processing of AIS data, namely the difference between the parameters "COG" (Course over the ground) and "HEADING" (Gyrocompass heading) at the moment the vessel begins maneuvering; according to our data, this difference in headings is $5 \div 8^\circ$; in addition, the vessel ROT parameter, which determines the turning speed, can be taken into account.

Thus, it is possible to identify groups of vessels interacting with each other (Fig. 4).

Identification of typical scenarios for interaction between vessels

Typical scenarios are presented in Figures 5-7, but are not limited to them. It is assumed that for identified real cases of vessels convergence that coincide with typical scenarios, interaction between vessels may or may not occur.

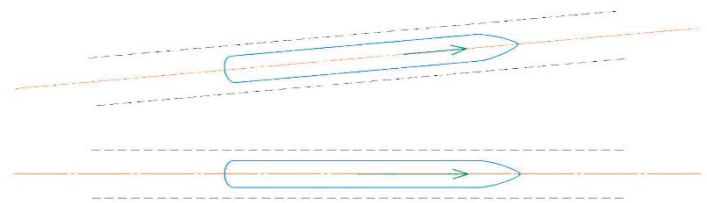


Fig. 5. Typical scenario under consideration No. 1 (vessels movement on parallel courses without interaction, with interaction)

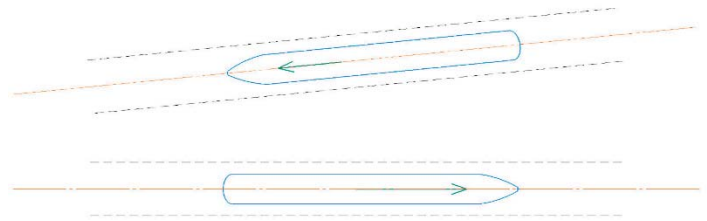


Fig. 6. Typical scenario under consideration No. 2 (vessels movement on reciprocal courses without interaction, with interaction)

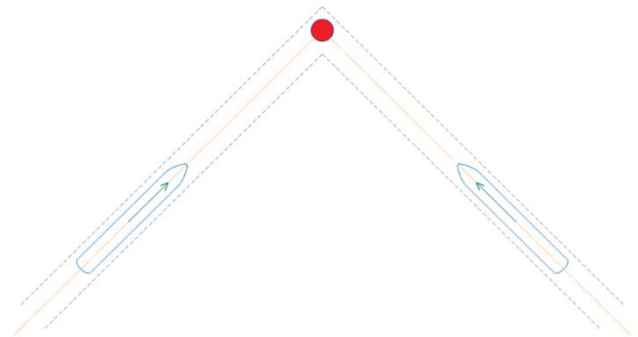


Fig. 7. Typical scenario under consideration No. 3 (vessels movement on crossing courses without interaction, with interaction)

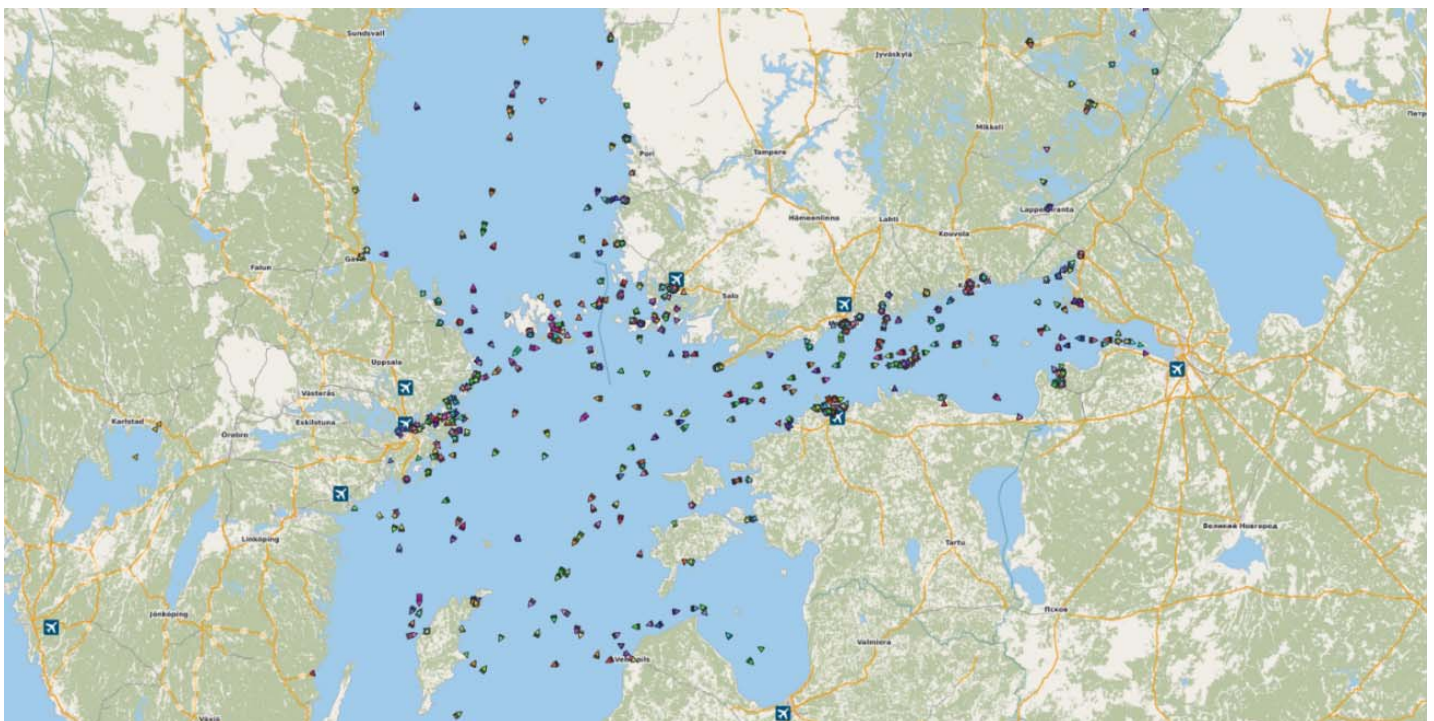


Fig. 4. A sample of AIS data with positions of vessels interacting with each other

During the analysis and development of the approach for testing SAS of MASS using archival AIS data, various situations are considered, including.

1. The movement of two vessels on parallel courses. The vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide in one direction, their speed is constant, the course (COG parameter) does not have sudden changes; the ROT (rate of turn) parameter along the entire route under study is 0, the difference in the COG (Course over the ground) and the HEADING (Gyrocompass heading) parameters ranges from -0.5 to +0.5, which indicates the absence of vessel maneuvers.

2. The movement of two vessels on parallel courses, with one of the vessels overtaking the other. The vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide in one direction, their speed is constant, one vessel overtakes another without performing any maneuvers. For both vessels, the course (COG parameter) does not have any sudden changes; the ROT (rate of turn) parameter along the entire route under study is 0, the difference in the COG (Course over the ground) and the HEADING (Gyrocompass heading) parameters ranges from -0.5 to +0.5, which indicates the absence of vessel maneuvers.

3. Divergence of two vessels on reciprocal courses. Vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide in reciprocal courses, their speed is constant, at one point in time the vessels diverge without maneuvering, for both vessels the course (COG parameter) does not have sudden changes; the ROT (rate of turn) parameter along the entire route under study is 0, the difference in the COG (Course over the ground) and the HEADING (Gyrocompass heading) parameters ranges from -0.5 to +0.5, which indicates the absence of vessel maneuvers relative to each other.

4. Divergence of two vessels on crossing courses. The vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide, narrowing at the point of divergence to 0.2 miles in one direction and on crossing courses. The vessels speed is constant, one vessel is ahead of the other, the time difference to the point of possible crossing of the vessels is 5 minutes, the distance to the crossing point is 3÷4 miles, for both vessels, the course (COG parameter) varies within 5°, the ROT (Rate of turn) parameter along the entire route under study is 0, the difference between the COG (Course over the ground) and HEADING (Gyrocompass heading) parameters ranges from -0.5 to +0.5, which indicates the absence of significant maneuvers of the vessels relative to each other.

5. Divergence of two vessels on crossing courses. The vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide on crossing courses; at a distance of 3÷4 miles to the point of possible collision, one of the vessels makes a maneuver, i.e. changes the course to move away from the crossing point, after 5 minutes the vessel returns to its previous course with a second maneuver; maneuvering is clearly monitored by the difference between the “COG” (Course over the ground) and the “HEADING” (Gyrocompass course) parameters and by changing the “ROT” (Rate of turn) parameter. The second vessel moves without changing speed, course and does not perform any maneuvers.

6. Divergence of two vessels on crossing courses. The vessels move in the open sea in the lane of 0.5÷0.7 miles wide on crossing courses; at a distance of 3÷4 miles to the point of possible collision, one of the vessels reduces speed and changes course to move away from the crossing point; maneuvering is clearly monitored by the difference between the “COG” (Course over the ground) and the “HEADING” (Gyrocompass course) parameters and by

changing the “ROT” (Rate of turn) parameter. The second vessel moves without changing speed, course and does not perform any maneuvers.

7. Interaction of vessels on parallel courses. The vessels move towards the exit from the port water area in the lane with a variable width from 0.2 to 0.7 miles on coinciding courses, one of the vessels is ahead of the other with reaching a constant course, the distance between the vessels is up to 2 miles. Maneuvers of both vessels with changes in speed and course occur; the parameters of interaction between the vessels are illustrated by AIS data.

8. Interaction of the tanker with the service boat in the water area to leave the port. The tanker performs several maneuvers, incl. reduces the speed to 6 knots and changes course several times; the boat approaches the tanker only with a decrease in speed and without changing course. The interaction of two vessels at the meeting point lasts no more than 5 minutes, while both vessels are moving at a speed of no more than 6 knots. Then the vessels diverge on different courses and pick up the required speed. It should be noted that this situation had occurred at the end of February, i.e. during the beginning of freezing-over.

9. Interaction of two vessels when diverging on crossing courses. The vessels move in the open sea at a distance of 3–4 miles (to the point of possible crossing). The peculiarity of this case is that the vessels do not change their speed; both vessels perform the maneuvers only by changing the course of movement. To diverge, one of the vessels undertakes two course-changing maneuvers at a constant speed. For both vessels, the ROT (rate of turn) parameter along the entire route under study is 0, which indicates the absence of sharp turns; the maneuvering time when diverging is 15 minutes; for the vessel performing the maneuvers the difference between the “COG” (Course over the ground) and “HEADING” (Gyrocompass heading) parameters ranges from -5 to +5.

Approach to testing SAS of MASS using archival AIS data

The sets of archival AIS data can be used as initial data for testing the operation of SAS of MASS. Despite their limitations in terms of complete coverage of the navigation situation (there is no hydrometeorological information, radar images, navigation and hydrographic support, etc.), AIS data is quite sufficient to identify possible interaction between vessels, incl. groups of vessels in a real situation, taking into account the actions of the vessel crew and the possibility of preliminary analysis of maneuvers performed by the crew. Thus, the archival AIS data for a certain shipping area is considered as a model one for setting test tasks for SAS of MASS, incl. reference tasks for modeling various navigation situations.

To develop model tasks for testing SAS of MASS, it is proposed to use archival information from AIS for a certain period of time (for example, 4-8 hours, or for the corresponding range of ship's AIS receivers and transmitters, i.e. up to 50 km, taking into account the time of the vessel movement) for water area with dense traffic of vessels in various directions and with various navigation situations. Model data is pre-synchronized with a frequency of 1 minute and can be transferred to the tested SAS of MASS using a given protocol to analyze its operation with the same frequency.

An example of a set of archival AIS data for a period (navigation situation in the Baltic Sea) is presented in Figure 8. Test tasks

for SAS of MASS can include a wide variety of navigation situations, for example, in accordance with the situations described earlier, or others, such as those requiring MASS maneuvering and those not requiring maneuvering.

An example of a test task to check the SAS of MASS performance is presented in Figure 9. The initial location of the vessel, its performance characteristics (according to the register book), speed and heading angle are transmitted to the SAS being tested. For the tested SAS, the task for the vessel to pass to a given location is set, but at the same time there is no information on the route, safe speed, the need of maneuvering, or any other information. Then, every minute, the tested SAS receives constantly updated information about other vessels (coordinates, speed, course, etc.) in the navigation area, which comes from the selected AIS archive. At the same time, the location and maneuvering parameters of the model vessel with the crew are unknown in advance to the SAS.

It should be noted that the number of such tasks is not limited in any way, i.e. there is the possibility of large-scale testing of SAS of MASS. Thus, the authors in [10], using a special algorithm, had created up to 1 thousand model situations and ungrouped them according to several criteria; it should be noted that only a small part of the scenarios had a pattern of a possible collision of vessels. In [17], the authors had proposed a modified approach, namely the generation of model scenarios based on archival AIS data by moving the timestamp, which allows creating various situations regarding the divergence and interaction of vessels. In [18], the authors had proposed a hierarchical method for assessing the graphical representation of possible vessel interactions with a 15-minute forecast horizon. In [19], the authors had proposed methods and models for clustering various navigation situations, which were further divided into normal and abnormal, on the basis of which various scenarios for testing MASS were developed.

The analysis of the results of testing the SAS of MASS proposed in the work includes:

- assessment of time it takes to complete a given route of the MASS under the control of SAS and the crew;
- assessment of deviation from the route of the MASS under the control of SAS and the crew;
- assessment of speed mode of the MASS under the control of SAS and the crew;
- comparison of completed maneuvers of the MASS under the control of SAS and the crew;
- comparison of maneuvers performed by the SAS and the crew (start, end, rate of turn);
- comparison of the MASS interaction with other vessels in cases similar to the crew control.

The results of a comparative analysis of the SAS of MASS operation and the crew actions are formalized according to the proposed table, where for each test parameter a criterion assessment is performed; it can have a qualitative assessment or a quantitative indicator, for example, in %, or be considered as (not) reaching the set threshold (critical) value. For all maneuvers undertaken, a qualitative assessment “Yes/No” is used.

When testing SAS of MASS using archival AIS data, a program with tests, which, depending on the goals and scope of testing, contains the following calculation justifications, is first drawn up:

- minimum/maximum number of test tasks;
- specified sequence of tests execution:

- movement of the MASS on a parallel course without interaction with other vessels;
- movement of the MASS on a parallel course with overtaking;
- movement of the MASS on crossing courses without interaction with other vessels;
- movement of the MASS on crossing courses with maneuvering in relation to other vessels;
 - special tests.

Table 1

Description of formalized parameters

Test parameters	Vessel under the crew control	SAS of MASS	Criteria-based assessment
Quantitative assessments			
Time it takes to complete a given route (route sections)	T _{CREW}	T _{SAS}	deviation percentage
Speed on the route section	V _{CREW}	V _{SAS}	deviation percentage
Vessel heading	Θ _{CREW}	Θ _{SAS}	deviation percentage
Distance to the “dangerous” vessel at the beginning of the maneuver	A _{CREW}	A _{SAS}	deviation percentage
Maneuver start time	M _{CREW-1}	M _{SAS-1}	deviation percentage
Maneuver end time	M _{CREW-2}	M _{SAS-2}	deviation percentage
Turning rate when maneuvering	Y _{CREW}	Y _{SAS}	deviation percentage
.....
Integral assessment			deviation percentage
Qualitative assessments			
Maneuver undertaken by changing course	Yes/No	Yes/No	Yes/No
Maneuver undertaken by changing speed	Yes/No	Yes/No	Yes/No
Maneuver undertaken by changing course and speed	Yes/No	Yes/No	Yes/No
.....
Integral assessment			Yes/No

Assessment of the SAS operation quality is carried out in real or accelerated time mode.

Conclusion

To the development of already known approaches [5-10, 15-19] to processing data obtained from AIS, in this work it is proposed to use data from AIS to analyze movement during potentially dangerous divergence maneuvers of vessels. Processing of this data will make it possible to develop recommendations to prevent the occurrence of situations of dangerous convergence of vessels, both under the control of a crew and autonomous ones [20]. This will make it possible to automatically solve the problems of assessing the navigation situation [21] and making decisions on maneuvering to avoid collisions [22], which will obviously improve the operation safety of autonomous sea vessels.

The MASS development in the future will require changes in the navigation and hydrographic support of waterways [23], which can also be preliminary analyzed using AIS data, for example, in the conditions of developing special test water areas [24].

An algorithm for processing and filtering data from AIS is proposed, and an approach for testing SAS of MASS is formulated. It is shown that this approach can be implemented in a simple and computationally efficient way. Identification of such situations

and creation of a database of dangerous convergences can be used to prevent vessels collisions with the designation of dangerous sections of the route.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping invites interested parties to test the developed systems for autonomous shipping and is ready to provide both test tasks and AIS data sets for modeling the navigation situation.

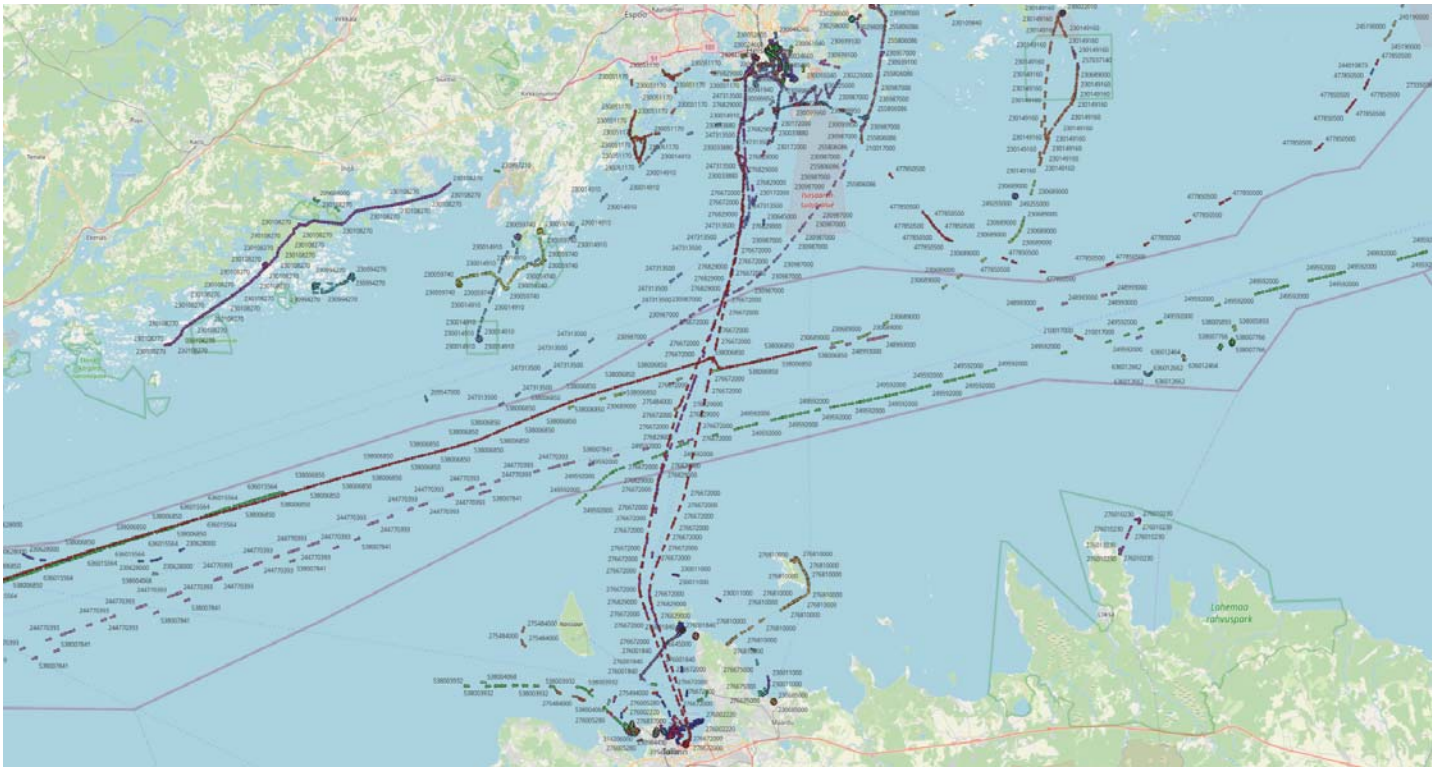


Fig. 8. Initial AIS data for testing SAS of MASS

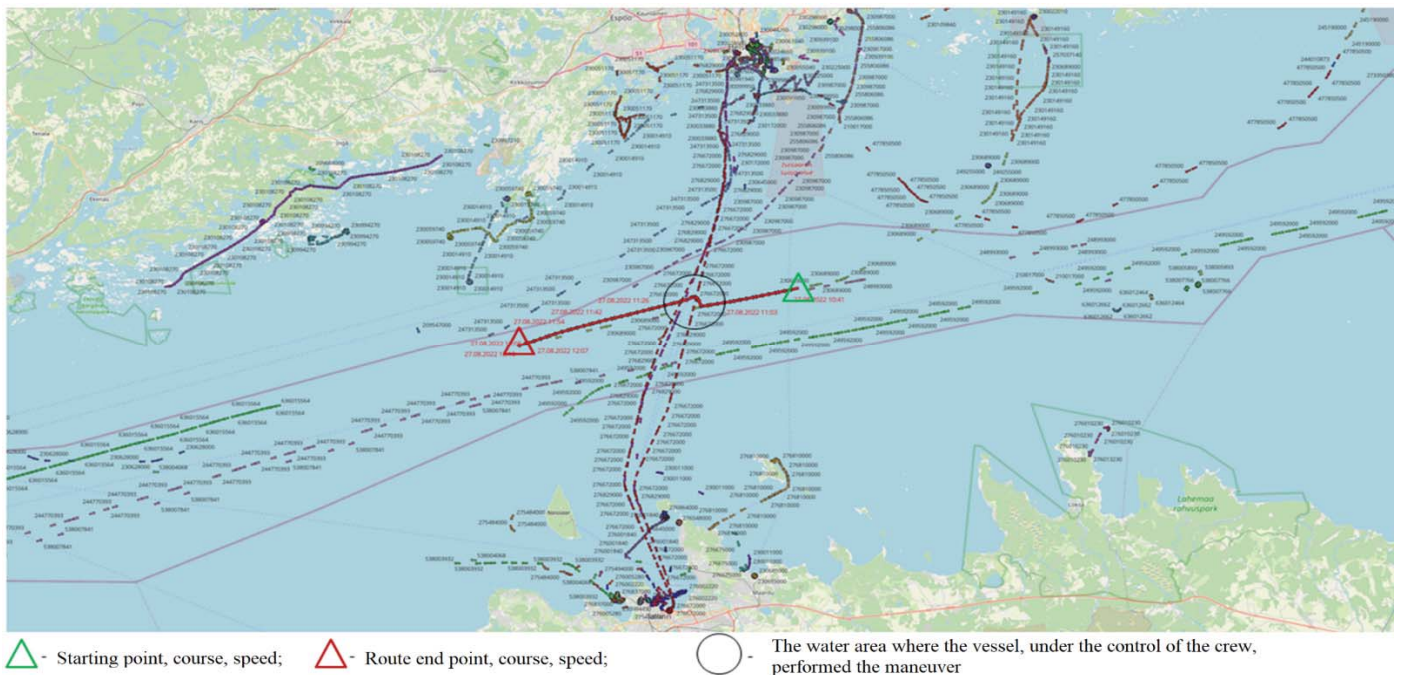


Fig. 9. An example of a test task to check the SAS of MASS performance

References

1. Recommendation ITU-R M.1371-5 Technical characteristics of an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band (02/2014).
2. Rules for the classification and construction of sea vessels, at 17:00. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2021.
3. IEC 62320-1:2015 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Automatic identification system (AIS) – Part 1: AIS Base Stations – Minimum operational and performance requirements, methods of testing and required test results.
4. A.A. Butsanets, "Organization of a remote control system for an unmanned technical fleet to ensure navigation on inland waterways," dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences: 05.22.19 / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov." St. Petersburg – 2021. 189 p.
5. L.M. Millefiori et al., "Adaptive filtering of imprecisely time-stamped measurements with application to AIS networks," *2015 18th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. IEEE, 2015, pp. 359-365.
6. K. Jaskólski et al., "Automatic Identification System (AIS) Dynamic Data Integrity Monitoring and Trajectory Tracking Based on the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Process Model," *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 24. P. 8430.
7. E. Tu et al., "Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey from data to methodology," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 19. No. 5, pp. 1559-1582.
8. J. Shi et al., "Generation of naturalistic and adversarial sailing environment (NASE) for intelligent test of autonomous ships," *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 285. P. 115438.
9. A. Bakdi, I.K. Glad, E. Vanem, "Testbed scenario design exploiting traffic big data for autonomous ship trials under multiple conflicts with collision/grounding risks and spatio-temporal dependencies," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 22. No. 12, pp. 7914-7930.
10. T. Hwang, I.H. Youn, "Navigation Situation Clustering Model of Human-Operated Ships for Maritime Autonomous Surface Ship Collision Avoidance Tests," *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 12. P. 1458.
11. F. Zhu, Z. Zhou, H. Lu, "Randomly Testing an Autonomous Collision Avoidance System with Real-World Ship Encounter Scenario from AIS Data," *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 11. P. 1588.
12. Norwegian Coastal Administration. AIS Norway. 2022. Available at: <https://kystverket.no/en/navigation-and-monitoring/ais/ais-norge/>
13. Marine traffic. Open data from Finnish waterways. <https://www.digitraffic.fi/en/marine-traffic/#vessel-locations>
14. L.O. Dreyer, "Relation analysis of ship speed & environmental conditions: Can historic AIS data form a baseline for autonomous determination of safe speed?" *The Journal of Navigation*. 2023, pp. 1-35.
15. H. Jincan, F. Maoyan, "Based on ECDIS and AIS ship collision avoidance warning system research," *2015 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*. IEEE, 2015, pp. 242-245.
16. D. Chen et al., "A research on AIS-based embedded system for ship collision avoidance," *2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2015, pp. 512-517.
17. V.M. Iskiv, A.A. Amelin, D.A. Mozzherov, "Transmitting part of the remote control system for an ultra-small unmanned vessel," *Modern problems of radio electronics and telecommunications*. 2021. No. 4, pp. 54.
18. S. Sumanto et al., "Supplier Selection Very Small Aperture Terminal using AHP-TOPSIS Framework," *Journal of Intelligent Computation and Health Informatics (JICHI)*. 2020. Vol. 1. No. 2, pp. 39-45.
19. H. Koo, J. Chae, W. Kim, "Design and experiment of satellite-terrestrial integrated gateway with dynamic traffic steering capabilities for maritime communication," *Sensors*. 2023. Vol. 23. NO. 3. P. 1201.
20. A. Vestre, A. Bakdi, E. Vanem, Ø. Engelhardttsen, "AIS-based near-collision database generation and analysis of real collision avoidance manoeuvres," *The Journal of Navigation*, 2021. Vol. 74. No. 5, pp. 985-1008.
21. S.V. Smolentsev, A.E. Filyakov, "Assessment of the degree of approach danger based on the dynamic ship safety domain," *Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova*. 2020. Vol. 12. No. 5, pp. 831-839.
22. S.V. Smolentsev, A.E. Sazonov, Yu.M. Iskanderov, "Cooperative maneuvering of unmanned vessels for safe divergence at sea," *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova*. 2018. Vol. 10. No. 4, pp. 687-695.
23. E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Zhidkova, "Assessment of the Possibility of Using a Waterway for Operation of Autonomous Ships," *Transportation Research Procedia: Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, Irkutsk-Krasnoyarsk*, 2022. Krasnoyarsk: Elsevier B.V., 2023, pp. 383-388. DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.051.
24. A. Butsanets, V. Karetnikov, E. Ol'khovik, "Overview of Test Water Areas for Testing Unmanned and Autonomous Vessels," *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021*, Novosibirsk, 2021. Vol. 402-1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 1474-1482. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_163.

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТИПОВЫХ СЦЕНАРИЕВ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ И ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ

Смоленцев Сергей Викторович, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия, smolencevs@gumrf.ru

Буцанец Артем Александрович, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия, butsanetsaa@gumrf.ru

Шахнов Сергей Федорович, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия, shahnovsf@gumrf.ru

Нырков Анатолий Павлович, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия, kaf_koib@gumrf.ru

Ольховик Евгений Олегович, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия, olhovikeo@gumrf.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема анализа данных автоматической идентификационной системы (АИС) с целью выделения типовых ситуаций встречи судов в море и выявления действий судоводителей по расхождению в этих ситуациях. Эта проблема становится актуальной в последнее время в связи с необходимостью иметь базу эталонных действий для тестирования систем автономного судовождения (САС), интерес к разработке которых в последнее время только усиливается в связи с созданием морских автономных надводных судов (МАНС). Алгоритм анализа данных АИС состоит из предварительного этапа фильтрации данных и двух основных этапов. На предварительном этапе исключаются данные, содержащие ошибки, существенно осложняющие последующий анализ и связанные с некорректной информацией. Выявлено, что такие данные могут составлять до 10% от общего массива информации. Далее, на первом этапе фильтрации отсеиваются суда, навигационный статус которых не предполагает движение или двигались со скоростью менее 3 узлов. На первом этапе фильтрации с 1,5 до 2 млн записей о навигационном статусе в сутки оставалось до 0,4-0,5 млн. Вторым этапом фильтрации стал анализ типового взаимодействия судов в различных условиях и ситуациях под управлением экипажа. Задачей данного этапа фильтрации стал отбор групп судов по следующим критериям: временная метка и местоположение судна, последнее должно соответствовать заданному диапазону по расчетному расстоянию между судами, которое выбирается из числа определенных заранее вариантов. Таким образом, в результате выполнения фильтрации были отобраны три типовых сценария. Первый - движение на параллельных курсах без взаимодействия, с взаимодействием. Второй - движение на встречных курсах без взаимодействия, с взаимодействием. Третий - движение на пересекающемся курсе без взаимодействия, с взаимодействием. Во время анализа типовых сценариев и для разработки подхода тестирования САС МАНС по архивным данным АИС были рассмотрены и описаны 9 типовых ситуаций взаимодействия судов во время опасного сближения. Предлагаемый в работе подход тестирования САС МАНС включает: оценку времени прохождения заданного маршрута; оценку отклонения от маршрута; оценку режима скорости; сравнение совершенных маневров; сравнение взаимодействия МАНС с другими судами.

Ключевые слова: морское автономное надводное судно, система автономного судовождения, безопасность мореплавания, автоматическая идентификационная система, анализ навигационной обстановки, расхождение судов, метод анализа данных.

Литература

1. Рекомендация МСЭ-R М.1371-5 Технические характеристики автоматической системы опознавания, использующей многостанционный доступ с временным разделением в полосе ОВЧ морской подвижной службы (02/2014).
2. Правила классификации и постройки морских судов, в 17 ч. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021.
3. IEC 62320-1:2015 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Automatic identification system (AIS) – Part 1: AIS Base Stations – Minimum operational and performance requirements, methods of testing and required test results.
4. Буцанец А.А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.19 / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова". СПб, 2021. 189 с.
5. Millefiori L.M. et al. Adaptive filtering of imprecisely time-stamped measurements with application to AIS networks // 2015 18th International Conference on Information Fusion (FUSION). IEEE, 2015. С. 359-365.
6. Jaskolski K. et al. Automatic Identification System (AIS) Dynamic Data Integrity Monitoring and Trajectory Tracking Based on the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Process Model // Sensors. 2021. Т. 21. №. 24. С. 8430.
7. Tu E. et al. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey from data to methodology // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Т. 19. №. 5. С. 1559-1582.
8. Shi J. et al. Generation of naturalistic and adversarial sailing environment (NASE) for intelligent test of autonomous ships // Ocean Engineering. 2023. Т. 285. С. 115438.
9. Bakdi A., Glad I. K., Vanem E. Testbed scenario design exploiting traffic big data for autonomous ship trials under multiple conflicts with collision/grounding risks and spatio-temporal dependencies // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Т. 22. №12. С. 7914-7930.
10. Hwang T., Youn I. H. Navigation Situation Clustering Model of Human-Operated Ships for Maritime Autonomous Surface Ship Collision Avoidance Tests // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Т. 9. №12. С. 1458.

11. *Zhu F., Zhou Z., Lu H.* Randomly Testing an Autonomous Collision Avoidance System with Real-World Ship Encounter Scenario from AIS Data // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Т. 10. №11. С. 1588.
12. Norwegian Coastal Administration. (2022). AIS Norway. Available at: <https://kystverket.no/en/navigation-and-monitoring/ais/ais-norge/>
13. Marine traffic. Open data from Finnish waterways. <https://www.digitraffic.fi/en/marine-traffic/#vessel-locations>
14. *Dreyer L.O.* Relation analysis of ship speed & environmental conditions: Can historic AIS data form a baseline for autonomous determination of safe speed? // *The Journal of Navigation*. 2023. С. 1-35.
15. *Jincan H., Maoyan F.* Based on ECDIS and AIS ship collision avoidance warning system research // 2015 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). IEEE, 2015. С. 242-245.
16. *Chen D.* et al. A research on AIS-based embedded system for ship collision avoidance // 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). IEEE, 2015. С. 512-517.
17. *Иськив В.М., Амелин А.А., Мозжеров Д.А.* Передающая часть системы дистанционного управления сверхмаломерным безэкипажным судном // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*. 2021. №4. С. 54.
18. *Sumanto S.* et al. Supplier Selection Very Small Aperture Terminal using AHP-TOPSIS Framework // *Journal of Intelligent Computing and Health Informatics (JICHI)*. 2020. Т. 1. №2. С. 39-45.
19. *Koo H., Chae J., Kim W.* Design and experiment of satellite-terrestrial integrated gateway with dynamic traffic steering capabilities for maritime communication // *Sensors*. 2023. Т. 23. №3. С. 1201.
20. *Vestre A., Bakdi, E Vanem, O. Engelhardtson.* AIS-based near-collision database generation and analysis of real collision avoidance manoeuvres // *The Journal of Navigation*. 2021. Т. 74. №5. С. 985-1008.
21. *Смоленцев С.В., Филяков А.Е.* Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2020. Т. 12. № 5. С. 831-839.
22. *Смоленцев С.В., Сазонов А.Е., Исхандеров Ю.М.* Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2018. Т. 10. №4. С. 687-695.
23. *OI'khovik E., Butsanets A., Zhidkova A.* Assessment of the Possibility of Using a Waterway for Operation of Autonomous Ships // *Transportation Research Procedia: Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, Irkutsk-Krasnoyarsk, 26-28 октября 2022 года*. Krasnoyarsk: Elsevier B.V., 2023, pp. 383-388. DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.051.
24. *Butsanets A., Karetnikov V., OI'khovik E.* Overview of Test Water Areas for Testing Unmanned and Autonomous Vessels // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021, Novosibirsk, 11-14 мая 2021 года*. Vol. 402-1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 1474-1482. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_163.

Информация об авторах:

Смоленцев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Автоматики и вычислительной техники" ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Буцанец Артем Александрович, канд. техн. наук, начальник отдела научно-технической информации и интеллектуальной собственности ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Шахнов Сергей Федорович, д.т.н., доцент, профессор кафедры судоходства на внутренних водных путях, ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова", г. Санкт-Петербург, Россия

Нырков Анатолий Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности" ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Ольховик Евгений Олегович, доктор технических наук, доцент, начальник управления научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова", г. Санкт-Петербург, Россия

ORGANIZERS:

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

INTERNATIONAL CONFERENCE

**«2024 International Conference
«Engineering Management of
Communication and Technology»
(EMCTECH)**

IEEE Conference

**16 – 18 October 2024
Vienna, Austria**

Conference will produce a publication.

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore and will be submitted also for indexing in Scopus and Web of Science data bases

The papers which are discussed at the conference can be divided into the following chapters:

CHAPTER 1. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN IOT DEVICES & ARTIFICIAL INTELLIGENCE

CHAPTER 2. TRANSPORT AND COLLECTIVE SYSTEMS: SMART CONTROL TECHNOLOGY IN TRANSPORTATION, BIOMEDICAL, FARMING AND CYBER PHYSICAL SYSTEMS (new opportunities using technology in biomedical, farming, transportation, and cyber physical systems)

CHAPTER 3. BROADCAST TECHNOLOGIES ADVANCEMENTS – RADIO, IP, CELLULAR, ON DEMAND, INTERACTIVE

CHAPTER 4. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN WIRE AND OPTICAL COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

CHAPTER 5. DIGITALIZATION PROCESS AND SECURITY MANAGEMENT IN DIGITAL SOCIETY AND INDUSTRY 4.0

CHAPTER 6. DIGITAL TRANSFORMATION AND DATA RISK MANAGEMENT IN ICT/TELECOMMUNICATION

CHAPTER 7. DEVELOPING PERSONAL SKILLS FOR LEADING INNOVATION INITIATIVES

CHAPTER 8. ENGINEERING TECHNOLOGY LEADING TO SOCIAL, POLITICAL AND ECONOMICAL CHANGE

Materials are available in English

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